

# 1

## Prolog

Im Prolog geht es um das Grundsätzliche und das Besondere: Welche Bedeutung hat Energie für den Menschen? Was ist Energie und in welchen Formen tritt sie auf? Welche Besonderheiten kennzeichnen den Energiesektor?

### 1.1 Energie als Teil der Geschichte der Menschheit

Nur wenn man sich ins Bewusstsein ruft, wie die Menschheit lebte, bevor das Feuer zu ihrem Begleiter wurde, und wie niedrig ihr Lebensstandard sein musste, solange sie für die meisten Arbeiten auf ihre eigene Muskelkraft angewiesen war, kann man die Bedeutung einer sicheren und wirtschaftlichen Energieversorgung in unserer heutigen Zeit ermessen.

#### 1.1.1 Das Feuer

... musst mir meine Hütte doch lassen steh'n  
und meinen Herd, um dessen Glut du mich beneidest ...

*(J. W. v. Goethe: Prometheus)*

Wodurch unterscheidet sich der Mensch vom Tier? Nicht durch den aufrechten Gang, der lässt auch die befleckten Pinguine so menschlich erscheinen, nicht durch den Gebrauch von Werkzeugen, denn manche Affen und Vögel können sehr erfindungsreich sein, um an schwer erreichbare Nahrung zu gelangen, auch nicht generell durch die Nutzung externer Energie, diese beherrschen etwa auch Vögel, die sich vom Wind kraftsparend in große Höhen tragen lassen. Aber vor dem Feuer haben alle Tiere Angst, allein der Mensch hat es sich dienstbar gemacht. Das Feuer steht nicht am Anfang der Mensch-

heitsgeschichte, die vor 3 Mio. Jahren in Afrika beginnt. Der Mensch musste erst eine gewisse Entwicklungsstufe erreicht haben, bis er das *Feuer* nutzen und kontrollieren konnte. In der Natur kommt Feuer selten vor: Man konnte es nur unter großer Gefahr bei Vulkanausbrüchen und durch Blitzschlag ausgelösten Bränden gewinnen. Bis der Mensch gelernt hatte durch Reiben von Holz, mühsam genug, feines brennbares Material zu entzünden, war das Hüten des Feuers eine wichtige und verantwortungsvolle Aufgabe. Wahrscheinlich begann die Nutzung des Feuers vor etwa 1 Mio. Jahren; die bisher ältesten archäologischen Beweise für eine systematische Nutzung des Feuers sind in einer 790 000 Jahre alten Siedlung des *Homo erectus* in Israel gefunden worden [1].

Das Feuer hielt wilde Tiere von den Lagern des Menschen fern. Seine Wärme ermöglichte ihm, sich auch in weniger günstigen Klimazonen anzusiedeln und damit größere Teile der Erde in Besitz zu nehmen. Welche neuen Möglichkeiten eröffneten sich den Menschen, als sie ihre Tätigkeiten nicht mehr mit dem Erlöschen des Tageslichtes einstellen mussten? Hat sich im Kreis um das Feuer eine höhere Sprache entwickelt, weil man Erlebnisse aus der Vergangenheit heraufbeschwor, Hoffnungen und Sorgen für die Zukunft miteinander teilte und die ersten Geschichten erfand? Auch die ältesten künstlerischen Darstellungen der Menschen aus der späten Steinzeit, die *Höhlenmalereien* (Abb. 1.1), können nur im Fackelschein entstanden und betrachtet worden sein.

Kontrolle und Erhalt des Feuers förderten auch die Ausbildung sozialer, arbeitsteiliger Strukturen. Da die zunehmende Größe des Gehirns einen wachsenden Anteil am Grundumsatz des *Homo erectus* und des *Homo sapiens* beanspruchte, kam es mehr und mehr auf eine energiereiche Ernährung an. Durch Kochen und Backen wurde die Zerteilung und Verdauung der *Nahrung* aus pflanzlichen und tierischen Kohlehydraten sehr erleichtert, so dass sich Kiefer und Verdauungsapparat verkleinerten. Für Aufbewahrung und Zubereitung der Nahrung schuf sich der Mensch mit Hilfe des Feuers, beginnend vor 20 000 Jahren, Gefäße aus Keramik; aus Ton gebrannte Öllämpchen waren über Jahrtausende die wichtigste nächtliche Lichtquelle. Für die Archäologen sind Spuren dieser ersten im Feuer geschaffenen Materialien die wichtigste Informationsquelle zur Datierung von Funden.



Abb. 1.1 Höhlenmalerei in Altamira (Spanien).

Das Feuer half den inzwischen weit über die Erde verteilten Menschen, die Kälteperiode des Pleistozän mit ihren zahlreichen, nur von kurzen Warmphasen unterbrochenen Eiszeiten (Abb. 2.6) zu überstehen, bis vor rund 10 000 Jahren unsere heutige *Warmzeit* und damit auch eine weit dynamischere Entwicklung der Menschheit begann.

Die Bedeutung des Feuers für die Entwicklung des *Homo sapiens* ist kaum zu überschätzen. In der griechischen Sage bestrafen die Götter *Prometheus*, weil er den Menschen das Feuer gebracht und sie damit den Göttern ähnlich gemacht habe.

Aber das Feuer konfrontierte den Menschen zum ersten Mal auch mit dem Problem, das mit jedem Energieverbrauch verbunden ist: der Nachbarschaft von Segen und Fluch. Denn das Feuer konnte auch die Behausungen zerstören, erntereife Felder vernichten, Menschen bei Wald- und Steppenbränden oder bei dem Versuch, das Feuer bei Gewittern und Vulkanausbrüchen zu erlangen, den Tod bringen. Wie jeder Fortschritt in der Geschichte der Menschheit war sicher auch die Einführung des Feuers von Rückschlägen begleitet, vielleicht auch schon von Auseinandersetzungen über das Für und Wider der Nut-

zung dieser neuen Errungenschaft. Wahrscheinlich hat es lange gedauert, bis das Feuer zum selbstverständlichen Begleiter der Menschheit wurde. Danach blieb das Holzfeuer lange die einzige Energiequelle der Menschheit, ergänzt um Bienenwachs und pflanzliches Öl für Lichtquellen.

Das Feuer hat die Entwicklung des Menschen gefördert, seine Verbreitung auf der Erde ermöglicht und seine Lebensbedingungen erweitert, aber dadurch war das Schicksal der Menschheit dann auch untrennbar mit der Nutzung des Feuers verbunden. Zum ersten Mal erfuhren die Menschen damit, dass die durch die Energietechnik erweiterten Lebensmöglichkeiten und Freiheiten neue Abhängigkeiten entstehen lassen, die kaum wieder rückgängig gemacht werden können. Was für ein Ausmaß im weiteren Gang der Geschichte diese Abhängigkeit bis heute angenommen hat, zeigt Exkurs 1 »Was bei einem Blackout geschieht«.

Erst im 9. Jahrtausend v. Chr. begann der Mensch, die Kraft domestizierter Tiere zu nutzen, zuerst die des Rindes als Tragtier.<sup>1)</sup> Fünftausend weitere Jahre dauerte es, bis der Mensch im Jungneolithikum erstmals die wegen ihrer Kraft und Geduld besonders geeigneten Ochsen für das Ziehen von Karren und Pflügen einsetzte. Später kamen andere Nutztiere dazu, darunter auch das Pferd, das bis vor 150 Jahren als schnellstes Verkehrsmittel diente. Genauso lange war der Mensch jedoch für die meisten Arbeiten auf die Kraft seiner eigenen Muskeln angewiesen.

Das Feuer wurde zum entscheidenden Hilfsmittel des Menschen bei der Entwicklung von Materialien und Werkzeugen, die zu höheren Lebensformen führten: 2200 v. Chr. begann die *Bronzezeit*, als die Menschen lernten, im Feuer aus Erzen Kupfer und Zinn für die Herstellung von Bronze zu gewinnen, ab 1200 v. Chr. schloss sich die *Eisenzeit* an. Diese Epochen werden deshalb nach diesen neuen Rohstoffen benannt, weil sie gesellschaftliche Umwälzungen auslösten, da nun Ressourcen und Know-how größere Bedeutung erlangten und dadurch soziale Unterschiede zunahmen. Die Römer setzten später das Feuer auch ein, um Ziegelsteine und Mörtel zu brennen, die eine elegantere und rationellere Bauweise ermöglichten (Abb. 1.2). Ihre Produktion nahm bereits halbindustrielle Züge an, und spätestens da-

1) [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_des\\_Transportwesens\\_im\\_Altertum](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_des_Transportwesens_im_Altertum), (11.02.2013).



**Abb. 1.2** Römischer Mauerwerk mit Kanälen der Warmluftheizung aus Thermen in Ostia Antica.

mit begann ein weiteres Konfliktthema der Energieverwendung, die Beeinträchtigung der Umwelt, denn der große Holzbedarf der Römer führte zum Raubbau an den Wäldern des Apennin, der, als das römische Reich unterging, praktisch abgeholzt war.

### 1.1.2 Erneuerbare Energien

Welche anderen Energiequellen hat sich der Mensch erschlossen? Wie hat er die erneuerbaren Energien genutzt, die ja seit jeher verfügbar waren?

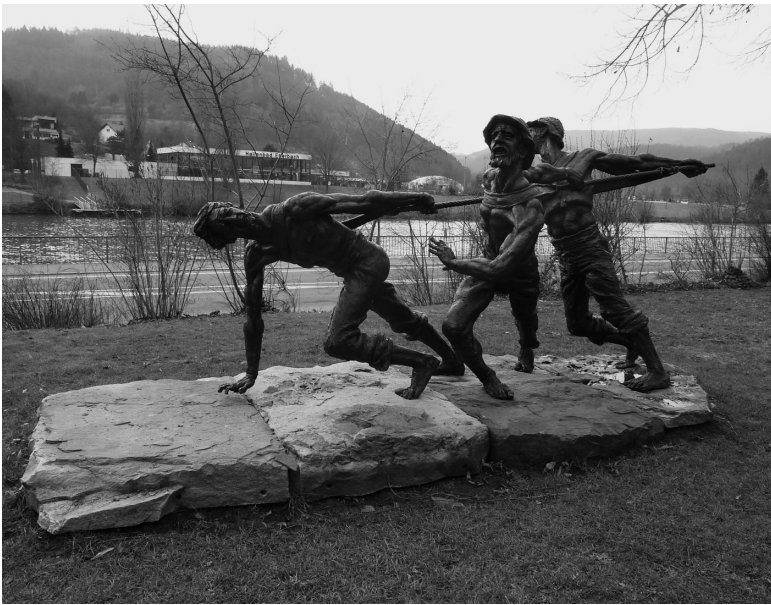
Natürlich wird der Mensch von Anfang an die Sonne genutzt haben, um Wäsche und Tierfelle zu trocknen oder Fleisch und Fisch haltbar zu machen. Aber das war nur eine weitere Wärmequelle neben dem Feuer.

Lange, sehr lange fehlte, abgesehen von Arbeitstieren und der eigenen Muskelkraft des Menschen, eine Kraftquelle zum Antrieb von Getreidemöhlen oder Wasserpumpen, von Fahrzeugen oder Schiffen. Bei der Erschließung der immer schon verfügbaren erneuerba-

ren Energien für diese Zwecke zeigt sich ein eigenartiges Bild, das nicht mit den Erfahrungen korrespondiert, die wir heute bei Innovationsprozessen machen. Heute reift eine neue Technik rasch in großen Schritten bis sie anwendungsfähig ist, danach müssen immer kleinere Entwicklungsfortschritte mit immer größerem Aufwand errungen werden. Die Nutzung der Wind- und Wasserkraft durch den Menschen entwickelte sich dagegen ganz anders. Sie begann vor weniger als 10 000 Jahren, blieb lange in rudimentären Stadien und erreichte ihre Blüte erst in der Mitte des letzten Jahrtausends, bis sie gegen dessen Ende vom Einsatz der fossilen Energien weitgehend abgelöst wurde [2].

Der älteste Beleg für die Nutzung des Windes ist die Abbildung eines *Segelschiffes* auf einer 7000 Jahre alten ägyptischen Totenurne. Der meist stromaufwärts wehende Wind war ideal für den Antrieb der Nilschiffe gegen die Strömung, die die Reise in der Gegenrichtung erleichterte. In der Antike hatten sich zunächst die Phönizier, dann auch die Griechen mit Segelschiffen bereits den ganzen Mittelmeerraum erschlossen und erste Expeditionen zu fernen Küsten unternommen. Aber ihre Schiffe, vor allem die Kriegsschiffe, wurden hauptsächlich von Ruderern angetrieben. Die Segelschiffe der Antike waren weitgehend auf Rückenwind angewiesen, bei Seitenwind musste man Kompromisse mit dem geplanten Kurs eingehen, bei Gegenwind kreuzen. Wegen des bis heute im Mittelmeerraum vorherrschenden Nordwestwindes konnte in der Antike eine Fahrt von Sizilien an die afrikanische Küste in 9–20 Tagen bewältigt werden, die Rückfahrt dauerte aber 45–60 Tage [2, S. 193]. Die Launen des Windes werden in einer der bedeutendsten Dichtungen der Antike, der von Homer in Verse gegossene Sage von den Irrfahrten des Odysseus, dafür verantwortlich gemacht, dass Odysseus, um nach dem trojanischen Krieg in seine nahe Heimat Ithaka zurückzukehren, mit seinem von Homer exakt beschriebenen Segelschiff [2, S. 162] jahrelang im ganzen Mittelmeer unterwegs war.

Die weitere Entwicklung führte zu Segelschiffen, die immer härter am Wind zu segeln vermochten, so dass sie weniger abhängig von der Windrichtung navigieren konnten. Um 1000 n. Chr. gab es die ersten wirklich leistungsfähigen Segelschiffe in Form der sicheren Dschunken in China und der sehr schnellen Boote der Wikinger. Aber erst im 15. Jahrhundert baute man Segelschiffe, die groß und leistungsfähig genug waren, um damit die Weltmeere zu erkunden, neue Kontinen-



**Abb. 1.3** Treidler-Denkmal in Eberbach.

te wie Amerika und Australien zu entdecken oder den Seeweg nach Indien und anderen asiatischen Ländern zu finden. Danach wuchsen die Segelschiffe weiter und wurden zu einem zuverlässigen Transportmedium, das die großen Reichtümer aus den Kolonien nach Europa brachte.

Auch die Binnengewässer waren wichtig für den Transport schwerer Güter. Im Schwarzwald ließ man Baumstämme sogar von Bächen, die angestaut wurden, in einem Wasserschwall zu Tal transportieren, von wo sie, zu großen Flößen zusammengestellt, den Rhein hinunter bis nach Holland gebracht wurden, um zum Bau von Fachwerkhäusern und Schiffen zu dienen. Flussschiffe mussten stromaufwärts getreidelt, das heißt auf eigens angelegten Uferstraßen von Tieren oder Menschen an Tauen geschleppt werden (Abb. 1.3). Einem wahrscheinlich nach der Natur am Oberrhein gemalten Bild von Hans Purmann aus dem Jahre 1901, das Männer beim Treideln eines Flusskahnes zeigt, kann man entnehmen, dass der äußerst mühsame Antrieb von Schiffen durch Menschen noch bis zum Anfang des letzten Jahrhunderts andauerte [3].



**Abb. 1.4** Holland-Windmühle in Vlissingen, im Hintergrund ihre 10-fach stärkeren Nachfolger.

Die Nutzung der Windenergie an Land wird erstmals in Byzanz um 1750 v. Chr. erwähnt, begann aber auch zeitgleich in Persien und China. Genutzt wurde die *Windenergie* zum Mahlen von Getreide und zum Pumpen von Wasser. Getreidemühlen breiteten sich danach über die ganze Welt aus. Ähnlich wie die Segelschiffe erreichten Windmühlen ihre Blüte Anfang des 16. Jahrhunderts, vor allem in Holland, wo sie in großer Zahl für die Entwässerung im Dienst der Landgewinnung eingesetzt wurden. Eine *Holland-Windmühle* (Abb. 1.4) konnte die Leistung eines heutigen kleineren Autos (30 kW) erreichen.

Windmühlen waren über lange Zeit ein Begleiter der Menschheit, so vertraut, dass Cervantes seinen Don Quichotte durch den Kampf gegen Windmühlenflügel zum skurrilen Symbol zwecklosen Widerstands machen konnte. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die Windmühlen dann durch den Siegeszug der elektrischen Energie bis auf einige Museumsstücke abgelöst, doch zum Ende dieses Jahrhunderts erlebte die Windenergie ihre Renaissance, nun für die Stromerzeugung in weit größeren Einheiten von einigen Tausend kW.





Abb. 1.5 Wassermühle bei Lüneburg.

Die Geschichte der *Wasserkraft* begann wahrscheinlich vor 7000 Jahren in China; ab 3500 v. Chr. wurden Wasserräder in Ägypten, Mesopotamien und Indien für die Bewässerung von Feldern eingesetzt. In der klassischen Antike wurde die Wasserkraft bereits in vielfältiger Weise genutzt, stets aber nur als kinetische Energie des fließenden Wassers. Wieder erst im 15. Jahrhundert begann man, die potenzielle Energie des Wassers zu nutzen, also Staudämme zu bauen oder Wasser aus Flussläufen oberhalb von Mühlen in einem Kanal abzuzweigen, um es von oben auf ein Mühlrad mit Gefäßen zu leiten, so dass es nun vom Gewicht des Wassers angetrieben wurde (Abb. 1.5). Damit erreichte die Wasserkraft in den folgenden Jahrhunderten große Bedeutung, vor allem für Getreidemühlen, Sägewerke und Hammer Schmieden. Mit dem Bau von Staudämmen entstand jedoch, wie immer bei der Ansammlung großer Mengen von Energie, auch ein neuer Risikofaktor: Beim Versagen des Staudamms drohten verheerende Überschwemmungen. Anders als die Windenergie kam die Wasserkraft nie aus der Mode. Zwar wurde sie als dezentraler Antrieb von Maschinen durch elektrische Energie abgelöst, stellt aber bis heute die effizienteste Quelle für deren zentrale Erzeugung dar.

Für alle anderen Arbeiten war nur die Kraft von Menschen oder Tieren verfügbar. In der Landwirtschaft zogen Rinder die Ackergeräte

und Transportkarren, aber säen, mähen und dreschen mussten die Menschen. Für den Transport von Gütern wurden, wo man es sich leisten konnte, Maultiere und Esel eingesetzt, oft genug aber mussten Menschen die Lasten auf ihrem Rücken tragen [2, S. 10–19]. Mussten? Noch heute ist in vielen Entwicklungsländern die menschliche Arbeit so billig, dass sich die Verhältnisse kaum geändert haben.

Reisen konnten die meisten Menschen nur zu Fuß, etwa um in anderen Regionen ihr Handwerk zu lernen, wie es lange üblich war. Die Oberschicht reiste in Pferdekutschen, die auf den schlechten Straßen aber lange Zeit kaum schneller als Wanderer waren. Das schnellste Verkehrsmittel war Jahrtausende lang das Reitpferd. Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts ließen die Straßen Reisegeschwindigkeiten der Kutschfahrzeuge von durchschnittlich 10 km/h zu, an einem Tag konnte man bestenfalls 100 km, meist deutlich weniger zurücklegen. *Goethes Italienreise* (1786–1788) von Karlsbad nach Neapel war unterteilt in 30 Tages-Etappen.

Die Wasserpumpen und die Mühlen, mit denen in der Antike Mehl gemahlen wurde (Abb. 1.6), auch die Kräne, die beim Bau der Basiliken, Arenen, Thermen und mehrstöckigen Wohnhäuser der Römer dienten, wurden überwiegend von Tieren oder Menschen an Drehgestellen oder in Laufkäfigen angetrieben. Auch für den Bau der Dome der Romanik und Gotik, sogar noch der Bahnhöfe im 19. Jahrhundert, war man auf die tierische und vor allem die menschliche Muskelkraft angewiesen [2, S. 101–117].

Der Hunger nach menschlicher Arbeitskraft führte früh zur Ausbildung der Sklaverei. Stämme unterwarfen andere Stämme, Völker benachbarte Völker, um über möglichst viele Sklaven zu verfügen. Auch die Kriege der Römer dienten nicht nur der Ausweitung ihres Imperiums, sondern der Gewinnung immer neuer Sklaven, ohne die das bemerkenswert angenehme Leben der Römer nicht möglich gewesen wäre. Den traurigen Höhepunkt erreichte die Sklaverei schließlich bei der Erschließung Nordamerikas. Erst die Aufklärung läutete mit dem wachsenden Bewusstsein für die Würde des Menschen ihr Ende ein. Aber danach und auch in Europa, das nach den Römern ohne Sklaven aus fremden Ländern auskam, mussten viele Menschen hart arbeiten, um kaum mehr als den nackten Lebensunterhalt zu verdienen: Knechte und Mägde in der Landwirtschaft, Gesellen, Lehrlinge und Gehilfen in den Handwerksbetrieben, Bedienstete bei den Händlern und im aufstrebenden Bürgertum erhielten als Lohn kaum



**Abb. 1.6** Galerie sogenannter pompejanischer Getreidemühlen in Ostia Antica. Bei der vorderen Mühle kann man den Querschnitt des doppelt konischen oberen Mahlsteins, bei der dahinter stehenden Mühle die Löcher zur Aufnahme eines Gestänges erkennen. Der geringe Abstand der Mühlen lässt eher einen Antrieb durch Sklaven als durch Tiere vermuten.

mehr als Kost und Logis. Eine bessere Entlohnung ließ die begrenzte Produktivität eines auf menschlicher Arbeitskraft basierenden Wirt-

schaftssystem auch nicht zu. Der Mensch kann als Dauerbelastung eine Leistung von ca. 80 W erbringen, die Arbeit eines ganzen Tages entspricht damit nicht einmal einer Kilowattstunde, für die wir heute ca. 28 ct bezahlen. Entsprechend niedrig waren die Löhne für Menschen, bei denen nur ihre physische Kraft und nicht auch ihre Intelligenz genutzt wurde – und sie sind es in Entwicklungsländern unter diesen Bedingungen auch heute noch. Um den Vergleich mit der Geschichte bis vor kaum mehr als 100 Jahren herzustellen, kann man unseren heutigen Energiebedarf auch in die Arbeitsleistung virtueller »Energie-Sklaven« umrechnen [4, S. 29]. Der Strombedarf eines Durchschnittshaushalts von ca. 11 kWh würde pro Tag im Durchschnitt 14 Sklaven beschäftigen. Es schadet nichts, sich bewusst zu machen, dass während des abendlichen Fernsehens zwei Sklaven auf einem Trimm-Dich-Rad mit Dynamo strampeln müssten, allein um den Strom für den Fernseher zu generieren.

Da das Stichwort »Krieg« gefallen ist, muss auch die unfriedliche Seite der Energietechnik erwähnt werden. Zu aller Zeit haben die Menschen neue Errungenschaften, oft genug zuerst, für kriegerische Zwecke eingesetzt. Für die Entwicklung neuer Materialien war meist der Bedarf für Waffen und Rüstungen maßgeblich. Der Erfindungsreichtum der Menschen führte schon in der Antike zu mechanischen Kampfmaschinen und Feuerschüssen; er erreichte im 20. Jahrhundert ein Potenzial, dessen Einsatz unseren Planeten unbewohnbar machen würde. Aber es gibt auch Ausnahmen: Als im 11. Jahrhundert n. Chr. das *Schwarzpulver* erfunden wurde, ein erster chemischer Energiespeicher, wurde es in Europa sofort zur Entwicklung von Schusswaffen benutzt. Die gleichzeitige Erfindung in China und Japan blieb dagegen weitgehend rituellen Zwecken und festlichen Ereignissen vorbehalten. Als sich die Briten im 19. Jahrhundert mit Gewalt Zugang zum chinesischen Markt verschafften, hatten die Chinesen ihrem Kanonenfeuer nichts Vergleichbares entgegensetzen [5]. In diesem Buch folgen wir dem Beispiel der Chinesen und konzentrieren uns auf die zivile Nutzung der Energie.

### 1.1.3 Kohle

Die Chinesen waren es auch, die als Erste Kohle als Wärmequelle nutzten, wie man aus den Berichten *Marco Polos* weiß. Anfang des 18. Jahrhunderts begann man in England, aus Mangel an Holz, auf



Abb. 1.7 Dampfmaschine von 1815.

Kohle als Brennstoff überzugehen, die infolge ihres Aschegehaltes und der schlechten Verbrennung in den offenen Kaminen für den berühmten Londoner Nebel verantwortlich war, der wiederum das passende Ambiente für die neue Gattung der Kriminalromane bildete.

Die Kohle wurde aber erst durch die *Dampfmaschine* zum wichtigsten Energieträger der entwickelten Welt. Aus ersten noch sehr ineffizienten Vorläufern hatte 1769 James Watt eine Dampfmaschine (Abb. 1.7) für den Antrieb von rotierenden Achsen entwickelt. Diese Erfindung hat die Welt in vielfacher Hinsicht verändert. Plötzlich stand mechanische Energie für Antriebe aller Art zur Verfügung, eine leistungsfähige und von den Launen der Natur unabhängige Kraftquelle, die für das Pumpen von Wasser, für den Betrieb industrieller Anlagen, für die Förderung der Kohle in Bergwerken, und für den Antrieb von Lokomotiven und Schiffen eingesetzt wurde. Zum ersten Mal konnte man aus Wärme, dem Endprodukt aller Energieumwandlungsprozesse, wieder höherwertige, direkt in Kraft umsetzbare

Energie gewinnen (vergl. Abschnitt 1.2). Damit begannen gleich mehrere neue Zeitalter: die Ära der Nutzung fossiler Energiequellen, die Großtechnik und die industrielle Revolution.

Der Übergang von Holz zu Kohle war nicht nur wegen des nun viel größeren Brennstoffangebotes vorteilhaft, entscheidend war auch die höhere Leistungsdichte der Kohle (Abb. 4.21). Dadurch erhöhte sich die Leistung der Dampfmaschine und verminderte sich der Raumbedarf für den Brennstoff, was vor allem für Lokomotiven und Schiffe wichtig, aber auch für stationäre Betriebe nützlich war. Die Nutzung der Kohle breitete sich auch unabhängig von der Dampfmaschine weiter aus, so für die Hausheizung, aber auch für die Gasversorgung. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts entstanden in allen Städten *Kokereien*, die aus Kohle Koks und Stadtgas sowie vielfältige Nebenprodukte mit großer Bedeutung für industrielle Anwendungen herstellten. Der Koks wurde vor allem zur Stahlherstellung benötigt, dem damals wichtigsten Industriezweig, aber auch für die Heizung. Für die Versorgung der Betriebe und Haushalte mit Stadtgas, einer Mischung aus Wasserstoff, Methan und dem giftigen Kohlenmonoxid, wurden Leitungen bis zu den Endverbrauchern verlegt, das erste System einer leitungsgebundenen Energieversorgung. Einige der als Puffer zwischen Kokerei und Verbraucher errichteten Gasspeicher, die Gasometer, sind bis heute erhalten geblieben. Außerdem erhellten Gaslampen nun die nächtlichen Straßen. In den Haushalten konnte man endlich kochen oder baden, ohne Stunden zuvor ein Feuer zu entzünden. Das Gaslicht ersetzte die dort bisher genutzten Kerzen und Petroleumlampen. Aber, kein Segen ohne Fluch, es kam auch zu Bränden, Explosionen und Vergiftungen.

Mit der Dampfmaschine begann das Zeitalter der Großtechnik. Die Dampfmaschine war besonders geeignet für Fabriken oder den Antrieb großer Schiffe, während sie sich weder als Motor von Kutschen oder Flusskähnen, noch zum Antrieb kleinerer stationärer Maschinen durchsetzen konnte. Als erstes Opfer wurden die Segelschiffe von Dampfschiffen verdrängt, die endlich den Menschheitstraum erfüllten, unabhängig von Stärke und Richtung des Windes mit gleicher Geschwindigkeit das Ziel ansteuern zu können. Weder ihre Schönheit noch ihr Nimbus aus der Zeit der Eroberung neuer Kontinente konnte die einst so stolzen Segler retten. Das Gemälde von William Turner »The Fighting Temeraire tugged to her last Berth to be broken up« aus dem Jahr 1838, auf dem Titelblatt dieses Buches, zeigt

wie ein wahrhaft feuriges Dampfschiff ein riesiges, leichenblasses Segelschiff zum Abwracken abschleppt, die damals berühmte »Fighting Temeraire«, die an zweiter Position an der Schlacht von Trafalgar teilgenommen hatte. Turners Bild ist eine schmerzlich-schöne Allegorie des Sieges des technischen Fortschritts über Tradition und Nostalgie in dieser bisher größten Energiewende der Menschheit.

Das Beispiel der Segelschiffe zeigt erstmals eine weitere Gemeinsamkeit vieler technischer Wandel in der Energietechnik: Die alte Technologie wird nie ganz verdrängt. Zwar sind Segelschiffe zum Transport von Gütern fast ganz verschwunden, nur innerhalb der indonesischen Inseln oder in einigen afrikanischen Ländern scheint die Zeit stehen geblieben zu sein, aber für Freizeit und Sport sind weiterhin Millionen von Segelschiffen auf den Meeren und Binnengewässern unterwegs.

Auch bei der Dampfmaschine waren die Vorteile nicht ohne Risiken und Schäden für die Umwelt zu haben. Jahrzehntlang kam es immer wieder zu *Kesselexplosionen*, die unter den vielen in der Nähe Arbeitenden zahlreiche Opfer forderten. Es dauerte lange, bis ausreichende Standards für die Wandstärken und Herstellungsprozesse der Kessel entwickelt waren. Die Dampfmaschine rief auch, zuerst in Preußen, die staatliche Gewerbeaufsicht auf den Plan, die die Sicherheit überwachte und durch ausreichend hohe Schornsteine für einen Schutz der Umgebung sorgte. Freilich bewahrten diese nicht vor den Schadstoffen, die von entfernteren Anlagen ausgingen. Ein wirksamer Schutz vor den Emissionen der Kohlekraftwerke begann erst in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts.

Auf dem Land konnten sich die *Windmühlen*, vor allem aber die Wasserkraft länger behaupten. 1895 waren im Deutschen Kaiserreich fast 60 000 Dampfmaschinen aber immer noch über 18 000 Windmühlen und mehr als 50 000 Wassermühlen in Betrieb.<sup>2)</sup>

Der Zwang zu großen Einheiten führte bei der Einführung der Dampfmaschine zu neuen Strukturen. Mehrere Flusskähne wurden, zu langen Konvois verbunden, von einem Schlepper gezogen. Da Ähnliches auf den holprigen Landstraßen und bei den engen Ortsdurchfahrten auf dem Land mit Kutschen nicht möglich war, wurde die *Eisenbahn* ausgebaut, deren Schienen die vielen von der Loko-

2) <http://de.wikipedia.org/wiki/Windmühle>, (11.02.2013).



**Abb. 1.8** Lokomotive der Preußischen Staatseisenbahnen ab 1882.

omotive (Abb. 1.8) gezogenen Wagen in der Spur hielten. Auch in Deutschland, das durch seine – damals – reichen Kohlevorkommen im Zuge dieser Entwicklung zu einer der führenden Industrienationen wurde, erlebte die Eisenbahn eine rasante Entwicklung. Erstmals konnte man sich ohne Muskelkraft an Land fortbewegen – und das sehr viel schneller als mit der Pferdekutsche. 50 Jahre nach dem Bau der ersten deutschen Bahnlinie zwischen Nürnberg und Fürth im Jahre 1835 waren in Deutschland fast 40 000 km Gleisanlagen in Betrieb, im Durchschnitt wurden also jedes Jahr 800 km Gleisanlagen gebaut.<sup>3)</sup> Die Eisenbahn wurde zum entscheidenden Wirtschaftsfaktor; wo sie nicht hinreichte, mussten Betriebe geschlossen werden. Die dadurch arbeitslos gewordenen strömten in die entstehenden industriellen Ballungsräume oder wanderten aus.

In der Industrie führte der Einsatz der Dampfmaschine zu Konzentrationsprozessen; es entstanden große Einheiten, die einen unstillbaren Bedarf an menschlicher Arbeitskraft entwickelten. Erneut veränderten sich durch eine neue Energietechnik die sozialen Strukturen: Zwischen der Führungsschicht, die die Technik kontrollierte,

3) [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_der\\_Eisenbahn\\_in\\_Deutschland](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Eisenbahn_in_Deutschland), (11.02.2013).



und den Arbeitern entstand eine wachsende Kluft, aus der sich Sozialismus und Kommunismus entwickelten und mit ihnen Konflikte, die erst mit dem Ende des letzten Jahrhunderts ihre Auflösung finden sollten.

#### 1.1.4 Elektrische Energie

Erste *Elektromotoren* gab es seit 1835, aber erst nach der Erfindung des *Generators* durch Werner von Siemens im Jahr 1866 konnte man auch in ausreichendem Umfang elektrische Energie zu ihrem Betrieb erzeugen. Die elektrische Energie hat nach und nach unzählige Bereiche der Kraftanwendung erreicht; sie vor allem ist es, die den Menschen von schwerer körperlicher Arbeit befreit hat. Heute ist unser Leben ohne den Elektromotor überhaupt nicht mehr vorstellbar, obwohl das den Wenigsten so bewusst ist. Wie viele Elektromotoren befinden sich in einem normalen Haushalt? Nein, nicht zehn oder zwanzig, wie häufig vermutet wird: Tatsächlich stecken in einem normalen Haushalt, in Küche und Bad, in Haushaltsgeräten und Spielzeug, in Unterhaltungselektronik und Computern, in Werkzeugen und Gartengeräten meist über 50 Elektromotoren, in einem Auto weitere zwanzig.

Weiter erhöhte sich die Attraktivität der elektrischen Energie durch die Erfindung der *Glühlampe*, bei der Edison 1880 der Durchbruch gelang (Abb. 1.9). Es ist erstaunlich, dass eine so ineffektive Maschi-

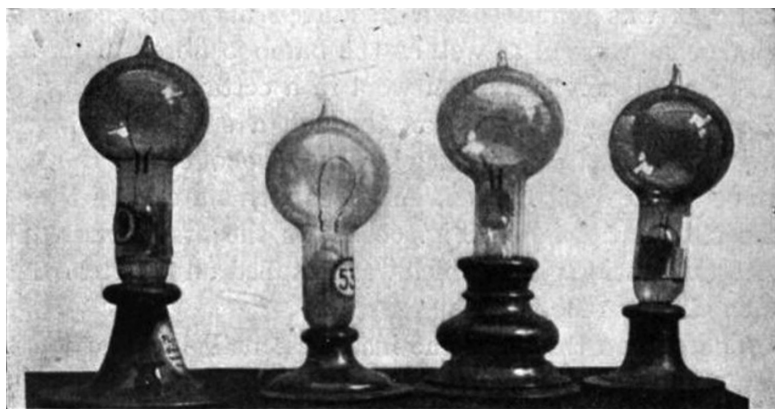


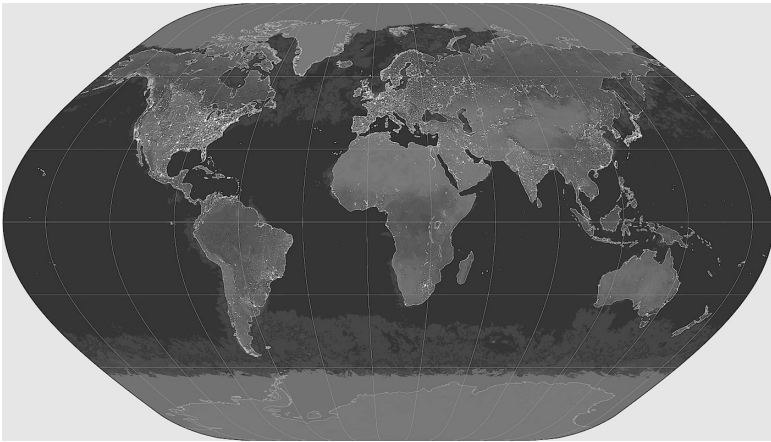
Abb. 1.9 Edisons Glühlampen.

ne – die Glühlampe setzt nur 5 % der verbrauchten Energie in sichtbares Licht um – die Welt veränderte und sich über mehr als hundert Jahre behauptete. Zum ersten Mal gab es Licht ohne offenes Feuer! Und Licht scheint den Menschen besonders wertvoll zu sein, fast alle schalten beim Verlassen eines Raumes das Licht aus, denken aber nicht daran, die viel mehr Energie verbrauchende Heizung zu drosseln.

Für die Erzeugung des elektrischen Stromes standen seit Ende des 19. Jahrhunderts mit der Dampfmaschine und der Wasserkraft zwei leistungsfähige Technologien zur Verfügung, die im Prinzip bis heute genutzt werden (Abschnitt 5.1.1). Der Strombedarf stieg in Deutschland seit 1900 bis in die letzten Jahre stetig an, nur nach der schweren Wirtschaftskrise der zwanziger Jahre, nach dem Zweiten Weltkrieg, während der ersten Energiekrise, nach der Wiedervereinigung und in der jüngsten Finanzkrise war er jeweils für einige Jahre rückläufig (Abb. 6.7). Ihren unvergleichlichen Siegeszug trat die elektrische Energie an, weil sie in äußerst vielseitiger Weise genutzt und am besten von allen Energieträgern gesteuert werden kann. Sie hat nicht nur die industrielle Produktion erleichtert, sondern auch den privaten Haushalt revolutioniert. Zahlreiche Haushaltsgeräte übernehmen heute die Aufgaben, für die Menschen früher selbst hart arbeiten oder Dienstboten beschäftigen mussten. Dank der elektrisch angetriebenen Geräte erreichte nun die Produktivität eines Arbeiters ein Vielfaches gegenüber dem Einsatz seiner Muskelkraft.

Als Heinrich Hertz 1888 in Karlsruhe die *elektromagnetischen Wellen* entdeckte, öffnete er die Tür zu ungeahnten neuen Möglichkeiten der technischen Kommunikation auf der Basis elektrischer Energie. Mit der Revolution der Informations- und Kommunikationstechnologien der letzten Jahrzehnte hat die Bedeutung der elektrischen Energie für uns noch mehr zugenommen und wieder neue soziale Strukturen entstehen lassen. Leider muss man hinzufügen, dass der Segen der elektrischen Energie auf der Welt ungleich verteilt ist (Abb. 1.10): Auch heute haben noch 1,3 Mrd. Menschen auf der Erde keinen Zugang zu elektrischer Energie [6, S. 469].

Heute spielt in der entwickelten Welt die Kraft des Menschen im Arbeitsprozess und im Haushalt kaum noch eine Rolle. Die physischen Anforderungen sind so gering geworden, dass die Menschen ihre Muskeln in Fitnessstudios künstlich pöppeln müssen. Durch den Einsatz immer komplexerer Maschinen stellt die berufliche Ar-



**Abb. 1.10** Alle Teile der Erde bei Nacht.

beit immer höhere intellektuelle Anforderungen; der Facharbeiter ist manchmal schwerer zu ersetzen als der Manager. Aktuell steht das Schulsystem in Deutschland in der Kritik, weil ein Teil der Absolventen nicht die gestiegenen Voraussetzungen für eine Ausbildung zum Facharbeiter erfüllt, mit dem Ergebnis, dass ein großer Bedarf an Fachkräften nicht gedeckt werden kann. Niedriglöhne kommen nur noch in Berufen vor, in denen die menschliche Arbeitskraft, wie im Gaststättengewerbe oder in der immer noch traditionell arbeitenden Baubranche, wenig von technischen Lösungen unterstützt wird. Grundsätzlich hat die Technisierung der Arbeitswelt mit höheren geistigen und geringeren physischen Anforderungen die soziale Stellung des Arbeitnehmers grundlegend verändert. Nicht umsonst war die »Elektrifizierung« eine Forderung der sozialen und sozialistischen Bewegungen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts; Lenin hat sogar Kommunismus als »Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes« definiert [7]. Die durch die elektrische Energie möglichen Innovationen haben entscheidend dazu beigetragen, dass sich zum Ende des letzten Jahrhunderts fast alle kommunistischen Machtstrukturen auflösten, weil es das Proletariat nicht mehr gab, zu dessen Verteidigung sie angeblich errichtet worden waren.

### 1.1.5 Erdöl und Erdgas

Durchbrüche für den *Verbrennungsmotor* kamen 1876 durch Nicolaus August Otto und 1892 durch Rudolf Diesel, mit deren Hilfe Karl Benz das erste Auto baute (Abb. 1.11). Otto- und Dieselmotor erwiesen sich bis heute als die idealen Antriebe für den Individualverkehr, da die Motoren genau in der jeweils erforderlichen Größe gebaut werden konnten und Dieselöl und Benzin als äußerst effiziente Energiespeicher große Reichweiten ermöglichen. Nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelte sich das Auto vom Luxusgegenstand zum Massenverkehrsmittel. Heute besitzt statistisch gesehen jeder zweite Deutsche ein Auto, Kinder und ältere Menschen, die noch nicht oder nicht mehr selbst fahren können, eingeschlossen. Der Güterverkehr wird überwiegend von 2,5 Mio. Lastkraftwagen bewältigt. Flussschiffe fahren nun ohne Schlepper individuell mit Dieselmotoren. Nur bei der Eisenbahn gibt es merkwürdigerweise immer noch Züge mit Lokomotiven, obwohl diese längst nicht mehr von Dampfmaschinen, sondern von Elektro- oder Dieselmotoren angetrieben werden.

In der so unglaublich innovativen zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts – technisch gesehen, die Politik war in überkommenen Traditionen erstarrt, was sich bald rächen sollte – begann der Mensch auch,

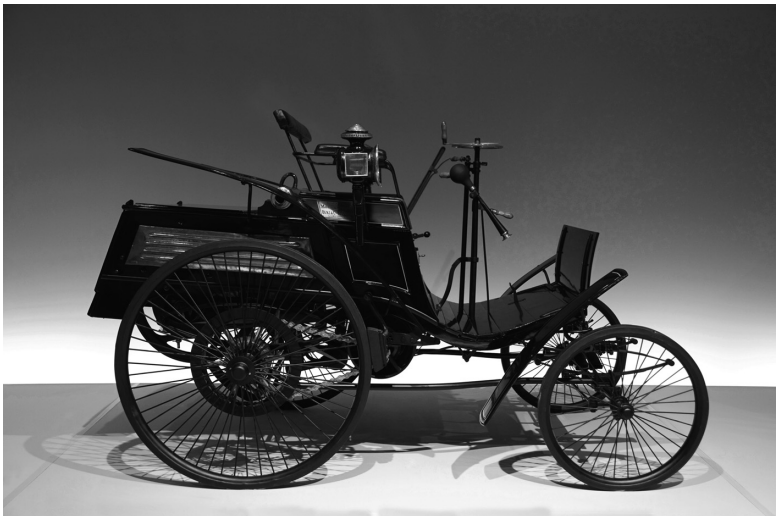


Abb. 1.11 Benz-Motorwagen 1894.

den alten Traum vom Fliegen zu verwirklichen. Eigentlich hatten das schon die Brüder Montgolfier getan, als sie 1783 den Heißluftballon erfanden, wozu keine neuen Erfindungen nötig gewesen waren; das, was man dazu brauchte, hatten auch schon die Ägypter. Aber diese *Montgolfieren* (Abb. 1.12) waren eher Attraktionen für Feste, keine Verkehrsmittel. Später griff Graf Zeppelin die Idee wieder auf, mit Maschinen, die leichter als Luft sind zu fliegen, ersetzte aber die durch Feuer erwärmte Luft durch leichtes Gas. Leider musste er Wasserstoff nehmen, weil Helium zu knapp und teuer war. Er baute riesige *Luftschiffe*, die mit Motoren steuerbar waren und äußerst luxuriöse Reisebedingungen boten. Selbst ein Klavier war an Bord. Die kurze Ära der Zeppeline endete dramatisch mit der Katastrophe von Lakehurst, als das Luftschiff LZ 129 »Hindenburg« 1937 bei der Landung aus immer noch ungeklärten Gründen verbrannte. Natürlich hätte man die



Abb. 1.12 Montgolfiere.

Brandgefahr vermeiden können, wenn man von Wasserstoff zu Helium übergegangen wäre, aber inzwischen waren die Flugzeuge besser und schneller als diese Dinosaurier der Lüfte, nur deren Komfort haben sie bis heute nicht erreicht. Bereits Leonardo da Vinci hatte Flugapparate ersonnen, die schwerer sind als Luft, doch selbst ihm war kein Erfolg vergönnt. Erst G. Weißkopf und die Brüder Wright haben mit den ersten Motorflügen die Tür zum Zeitalter der *Luftfahrt* geöffnet. Da man rasch feststellte, dass Flugzeuge auch als Jäger und Bomber zu gebrauchen waren, sorgte die kriegerische erste Hälfte des 20. Jahrhunderts für einen rasanten Fortschritt der Flugzeugtechnik. Ab Mitte des letzten Jahrhunderts ging man von Kolbenmotoren zu Turbinen über, und das Flugzeug wurde für viele Menschen zu einem wichtigen Transportmittel. Nun konnte man in der Zeit einer Postkutschen-Etappe zu einem anderen Kontinent gelangen. Seit wenigen Jahren gibt es mit dem Airbus 380 wieder ein Fluggerät, das an die Maße des Zeppelins erinnert. Es befördert über 500 Passagiere, nicht nur dreißig, wie der Zeppelin, aber ein Klavier sucht man in ihm vergeblich.

Ermöglicht wurde diese Revolution der menschlichen Mobilität durch das Erdöl, das ab 1960 die Kohle als wichtigsten Energieträger auf den zweiten Platz verwies. Bei ähnlicher Energiedichte haben die Erdölprodukte Benzin, Dieselöl oder Kerosin den Vorteil, in flüssiger Form, zudem drucklos, transportiert und gelagert werden zu können. Kein anderer Energiespeicher ist so leistungsfähig, so sicher, so schnell zu füllen, so flexibel in der Form wie ein Tank für Mineralölprodukte. Die Auffächerung des Erdöls in *Raffinerien*, in denen die zahlreichen verschiedenen Komponenten, aus denen sich das Erdöl zusammensetzt, nach ihren unterschiedlichen Siedepunkten getrennt werden, erschloss dem Erdöl viele unterschiedliche Anwendungen, auch außerhalb des Verkehrssektors. In den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts löste das Heizöl die Kohle- und Koksheizungen der Häuser ab, weil man nicht mehr zum Schaufeln in den Keller musste; nun genügte ein kleiner Griff an den Thermostaten in der Wohnung, um für behagliche Wärme zu sorgen. In vielen Ländern wurden Erdölprodukte zur Stromerzeugung eingesetzt; noch heute ist in schlecht erschlossenen Regionen der Welt der Dieselgenerator nur schwer durch andere Technologien zu verdrängen.

Das Erdöl ermöglicht auch die Herstellung von Kunststoffen, Medikamenten und Kosmetika, für die es bis heute die wichtigste Roh-

stoffquelle ist. So groß die Vielfalt und die Menge der Kunststoffe ist, die uns im Haushalt und in der Kleidung, im Auto und im Flugzeug umgeben, so bescheiden erscheint der Anteil von 6 % am Erdölverbrauch, der für die Herstellung all dieser Stoffe ausreicht – eine Tatsache, die uns die gewaltige Dimension des Energiehungers der Welt verdeutlicht.

Aber auch das Erdöl hat seine Schattenseiten. Da es im mobilen Bereich kaum zu ersetzen ist, bildet es heute das größte Sorgenkind der Klimapolitik (Kapitel 2). Zu Problemen führt auch die ungleiche Verteilung der Ressourcen über die Welt (Abschnitt 3.2.2). Die mit Abstand größten und auch am preisgünstigsten zu fördernden Ölserven birgt die Arabische Halbinsel. Die entstandene Abhängigkeit von dieser Region wurde der Welt 1973 und 1979 durch künstlich geschaffene Verknappungen und Verteuerungen der Öllieferungen plastisch vor Augen geführt. Diese Energiekrisen haben tiefe Spuren hinterlassen, weil sie zeigten, wie sehr die Welt inzwischen von diesem Energieträger abhängig geworden war und wie sorglos sie seine Verfügbarkeit für selbstverständlich gehalten hatte. Die künstliche Verknappung deutete man auch als Vorbote einer in absehbarer Zeit unvermeidlichen physischen Erschöpfung der Erdölvorräte, die allerdings nach heutigen Erkenntnissen noch einige Zeit auf sich warten lassen wird (Abschnitt 3.2.2). Die damals weltweit propagierte Politik »Weg vom Öl« war allerdings wenig erfolgreich, noch mindestens weitere 20 Jahre wird das Erdöl der wichtigste Energieträger der Welt bleiben. Weiterhin wird der Ölpreis das Preisniveau anderer Energieträger, insbesondere des Erdgases, und damit auch die Chancen von Alternativen beeinflussen, die während Hochpreis-Phasen stets Auftrieb erhalten, in Zeiten billigen Öls aber schon bald wieder vernachlässigt werden.

Die Rolle des Erdöls wäre aber noch wesentlich größer, wenn es nicht in den letzten 40 Jahren Konkurrenz durch das Erdgas erhalten hätte. Das hauptsächlich aus Methan bestehende Erdgas kann leicht von Verunreinigungen befreit werden und setzt bei der Verbrennung deshalb kaum Schadstoffe frei. Es kommt in vielen Regionen der Welt vor, in Europa vor allem in der Nordsee vor Norwegen, den Niederlanden und Großbritannien – vorübergehend, muss man sagen, denn die Vorkommen gehen in Großbritannien jetzt schon und in Norwegen bald zur Neige. Aber die Erdgasvorräte sind weltweit größer und gleichmäßiger verteilt als die des Erdöls und bei hohen Energieprei-

sen auch durch neue Abbaumethoden erweiterbar, so dass man weltweit die kommenden Jahre als goldene Jahre für das Erdgas ansieht (Abschnitt 3.3.3). Für stationäre Anwendungen, Stromerzeugung und Raumheizung, hat das Erdgas das Erdöl weitgehend verdrängt.

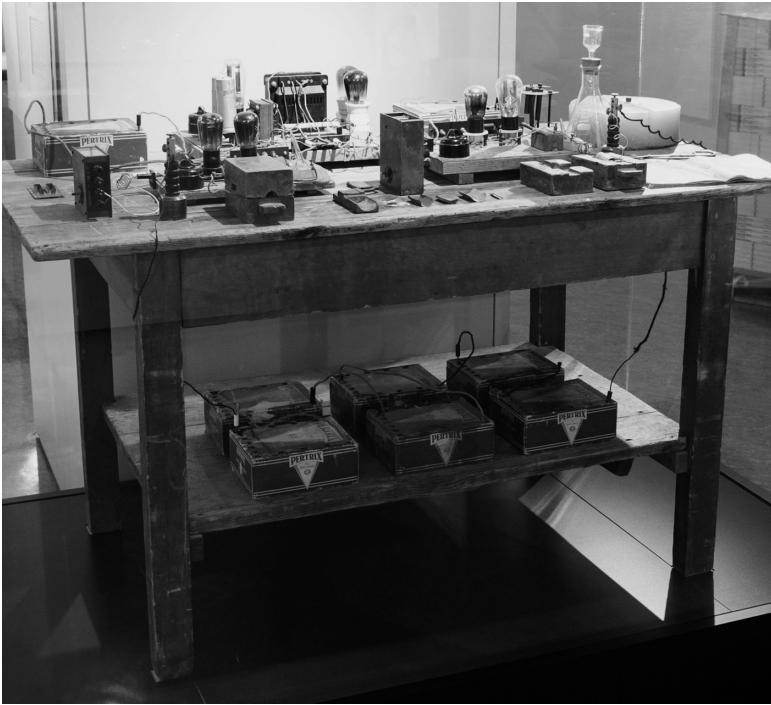
#### 1.1.6 Kernenergie

Für den Fortschritt in der Energietechnik war die von zwei Weltkriegen gebeutelte erste Hälfte des 20. Jahrhunderts weitgehend verloren, sieht man von kriegsbedingten Entwicklungen wie der Kohleverflüssigung und -vergasung ab, die jedoch in Friedenszeiten keine große Rolle mehr spielt. Aus dieser Zeit stammt aber ein großer Entwicklungssprung, der sich erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auswirkte: die Anwendung der 1938 in Deutschland von Lise Meitner und Otto Hahn entdeckten Kernspaltung (Abb. 1.13).

Der Fluch dieser neuen Energiequelle manifestierte sich schnell. Angefacht von dem bald nach der Entdeckung ausgebrochenen Zweiten Weltkrieg wurde sie zuerst für die Entwicklung einer Waffe benutzt, die mit ihrem Zerstörungspotenzial alle bisherigen um Größenordnungen übertraf. Das Kriegsende im Mai 1945 ersparte Deutschland die Erfahrung, die Japan im August 1945 mit den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki machen musste. Die dort sichtbar gewordene furchtbare Zerstörungskraft hat bislang einen weiteren Einsatz in kriegerischen Auseinandersetzungen vermeiden helfen, obwohl (oder weil) daraus in den Folgejahren ein gewaltiges Arsenal von noch weit stärkeren Waffen entwickelt wurde, dessen Einsatz unseren Planeten unbewohnbar machen würde. Nicht nur die USA, die das Wettrennen um die Atomwaffe gewannen, auch die anderen siegreichen Kriegsparteien in Europa, Frankreich, Großbritannien und die UdSSR haben diese Atombombe entwickelt, Deutschland glücklicherweise nicht.

Nach dem Ende des Krieges verschrieben sich weltweit die besten Wissenschaftler und Techniker der Aufgabe, nun auch den Segen dieser Entdeckung zur Geltung zu bringen. In den fünfziger und sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurde die Kerntechnik weltweit als Zukunftstechnologie schlechthin angesehen, denn in dieser Technik kulminierte die bisherige Entwicklung der Energietechnik: Aus geringen Mengen zu nichts anderem geeigneter Rohstoffe werden nahezu unerschöpfliche Mengen an Wärme und elektrischer Energie





**Abb. 1.13** Nachbau des Experiments, mit dem Otto Hahn und Lise Meitner die Kernspaltung entdeckten.

gewonnen, nie zuvor haben Menschen aus so kleinen Volumina so gewaltige Mengen an Energie freigesetzt und so hohe Leistungsdichten erreicht. Wenige Anlagen mit geringem Landbedarf reichen zur Versorgung eines Landes aus, sie verursachen im normalen Betrieb keine Umweltschäden und beeinflussen anders als die fossilen Energien das Klima nicht (Abb. 1.14).

Aber auch unabhängig von der Gefahr der Atomwaffen erreicht der alte Konflikt zwischen Segen und Fluch bei der Kernenergie eine neue Dimension. Beim Betrieb der Kernkraftwerke entstehen große Mengen an radioaktiven Abfällen, deren Freisetzung außergewöhnlich große Schäden verursachen würde. Die Kernenergie ist deshalb eine sehr komplexe Technologie, die allerhöchste Anforderungen an die Sicherheitsvorkehrungen stellt. Zwar zeigen alle Untersuchungen, dass das resultierende Risiko gering ist, doch wird dieses Risiko



**Abb. 1.14** Kernkraftwerk und Kohlekraftwerk Borssele (Niederlande), umgeben von Windenergieanlagen.

hier aus dem Produkt zweier extrem unterschiedlich großer Zahlen errechnet, einem sehr hohen Schadenspotenzial und einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Schadens. Dieses so definierte Risiko war für die Techniker Ansporn zur Schaffung einer außergewöhnlich hohen Sicherheitskultur, für viele andere Menschen aber der entscheidende Grund, diese Technologie abzulehnen.

Das anfangs, vor allem in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts weltweit starke Wachstum der Kernenergie hat sich abgeflacht. Seit 20 Jahren ist die Zahl der etwa 440 in der Welt betriebenen Kernkraftwerke nur noch langsam gestiegen, allerdings zeichnete sich eine neue Wachstumsphase in einigen Regionen der Welt ab. Nach dem Unfall in dem japanischen Atomkraftwerk Fukushima (Exkurs 3 »Was in Fukushima geschah«) sind diese Pläne in einigen Ländern geändert worden. Deutschland hat sich 2011 entschieden, seine Kernkraftwerke bis 2022 stillzulegen und stattdessen seine Versorgung mit elektrischer Energie auf erneuerbare Energien umzustellen.

Das sind zwei Entscheidungen auf einmal. Der Verzicht auf Kernenergie ist für ein reiches Industrieland mit wirtschaftlichen Opfern verbunden, aber verkraftbar; er erschwert und verteuert jedoch den Schutz vor einer Klimaveränderung (Abschnitt 2.2). Aber kann eines

der führenden Industrieländer der Welt, wenn auch mit neuen Methoden, wieder zurückkehren zu den Zuständen vor der Industrialisierung, als der Mensch sich noch halbwegs im Gleichgewicht mit der Natur befand? Die Entwicklung der Energietechnik, die im ersten Abschnitt dieses Kapitels an uns vorbeigezogen ist, war geprägt von dem Ziel, die Launen der Natur zu überwinden und sich mit der begrenzten Energiedichte der erneuerbaren Energien nicht abzufinden. Wenn wir in Deutschland künftig über 80% der elektrischen Energie aus Wind und Sonne gewinnen wollen, und das ist das Ziel bis 2050, dann unterwerfen wir uns aber unvermeidlich wieder den Regeln der Natur, denn an eine wirksame Speicherung zum Ausgleich der schwankenden Verfügbarkeit dieser Energiequellen ist nicht zu denken. Vieles kann durch moderne Technologien erleichtert werden, aber von der Zeit, in der wir jederzeit unbegrenzte Mengen an Energie abrufen konnten, müssen wir dann Abschied nehmen. Denn ohne »Demand Management«, wie das heute heißt, also ohne Beschränkungen oder Steuerung des Bedarfs, kann eine auf erneuerbare Energien gestützte Energieversorgung nicht funktionieren. Wir brechen damit auf zu einem Großexperiment, bei dem uns bisher kein anders Land der Erde übertrifft, und wir müssen bei den vielen Schritten, die zur Annäherung an dieses Ziel notwendig sind, sorgfältig darauf achten, nicht die Errungenschaften aufs Spiel zu setzen, die uns die bisherige Entwicklung der Energietechnik gebracht hat.

## 1.2 Ein bisschen Physik muss sein

$$E = mc^2$$

*(Albert Einstein)*

Energie ist die fundamentale Grundgröße der Physik. Nach Einsteins berühmter Äquivalenzgleichung ist Materie bzw. Masse ( $m$ ) nichts anderes als kondensierte Energie ( $E$ ). Da die Proportionalitätskonstante, das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ), eine sehr große Zahl ist, kann man aus wenig Materie sehr viel Energie freisetzen. Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.

### 1.2.1 Formen der Energie

Energie tritt in verschiedenen Formen auf. Wir kennen z. B.

- die kinetische Energie bewegter Körper,
- die potenzielle Energie eines Körpers in einem Kraftfeld, z. B. dem Schwerfeld der Erde,
- die Energie elektrischer Ströme, elektromagnetischer Strahlung und Felder
- die chemische Bindungsenergie und
- die nukleare Bindungsenergie.

Verschiedene dieser Energieformen lassen sich ineinander umformen. Bei einer Schaukel sieht man die permanente Umwandlung von potenzieller Energie, die ihr Maximum beim Scheitelpunkt der Schwingung erreicht, und kinetischer Energie, die am tiefsten Punkt der Schaukel am größten ist. Dass die Schaukel ohne Antrieb mit der Zeit zum Stillstand kommt, liegt an der Reibung in der Aufhängung und am Luftwiderstand; beide verwandeln die kinetische Energie langsam in Wärme. Wärme ist die ungeordnete kinetische Energie der Moleküle, die in festen Körpern Schwingungen vollführen und sich in Flüssigkeiten und Gasen frei bewegen. Wärme ist der Endzustand aller Energieumwandlungsprozesse.

Die physikalische Einheit der Energie ist 1 Wattsekunde (Ws), man nennt sie auch 1 Joule (J). Zufällig liegt diese Größe ziemlich genau in der Mitte der allerdings gigantischen Spanne der Energiemengen, die man in einem Buch wie diesem betrachten muss. Sie liegt fast 20 Größenordnungen (also multipliziert mit einer 1 mit 20 Nullen) über den Energien, die bei chemischen Umwandlungen einzelner Moleküle oder einzelner photovoltaischer Prozesse frei werden, und wieder rund 20 Größenordnungen unter der Energiemenge, die die Welt pro Jahr benötigt. Leider können wir sie in diesem Buch nicht einheitlich verwenden, weil sich für die einzelnen Energieträger unterschiedliche Größen eingebürgert haben. In Berichten über Erdöl werden die Mengen in Barrel angegeben, gemeint ist das alte Blechfass, das 156 l Öl enthält, während man bei Kohle in Tonnen Steinkohleeinheiten (tSKE) rechnet. Wärmemengen werden immer noch gern mit Kalorien (cal) gemessen, der Menge, mit der man 1 g Wasser um 1 °C, genau genommen von 14 auf 15 °C erwärmen kann. Und Strom wird in Kilowattstunden (kWh) eingeteilt, elektrische Leistungen in Watt (W)

**Tab. 1.1** Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren.

Energie	J	cal	eV	kWh	KgSKE	
Joule	J	1	0,24	$0,62 \times 10^{19}$	$2,78 \times 10^{-7}$	$3,41 \times 10^{-8}$
Kalorie	cal	4,19	1	$2,63 \times 10^{19}$	$1,16 \times 10^{-6}$	$1,42 \times 10^{-7}$
Elektronvolt	eV	$1,60 \times 10^{-19}$	$3,83 \times 10^{-20}$	1	$4,45 \times 10^{-26}$	$5,47 \times 10^{-27}$
Kilowattstunde	kWh	$3,60 \times 10^6$	$0,86 \times 10^6$	$2,25 \times 10^{25}$	1	0,12
Terrawattjahr	TWa	$3,16 \times 10^{19}$	$0,75 \times 10^{19}$	$1,97 \times 10^{38}$	$8,77 \times 10^{12}$	$1,08 \times 10^{12}$
Kg Steinkohle	kgSKE	$2,93 \times 10^7$	$7,0 \times 10^6$	$1,83 \times 10^{26}$	8,14	1
t Öläquivalent	tOE	$4,19 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{10}$	$2,61 \times 10^{29}$	$1,16 \times 10^4$	$1,43 \times 10^3$

**Tab. 1.2** Größenordnungen der Energieformen.

Peta	Tera	Giga	Mega	Kilo	–	Milli	Mikro	Nano
P	T	G	M	k		m	$\mu$	n
$10^{15}$	$10^{12}$	$10^9$	$10^6$	$10^3$		$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$

bzw. kW. Auch die Leistung von Automotoren wird heute in kW angegeben, aber immer noch gerne in die guten alten Pferdestärken (PS) umgerechnet, weil man damit eine um den Faktor 1,36 größere, also imposantere Zahl erhält. Ach ja: Leistung ist Arbeit (also Energie) pro Zeit, und das nicht nur in der Physik!

Zur Umrechnung innerhalb der verschiedenen Energieeinheiten kann man die folgende Tab. 1.1 oder *Umrechner* im Internet benutzen.

Die bei den Umrechnungen benutzten Größenordnungen gibt Tab. 1.2 wieder.

Energie kann Kraftwirkungen verursachen. Dabei gibt es vier verschiedene Wechselwirkungen. Zwei davon sind uns gut vertraut, auch weil wir sie in bestimmten Formen unmittelbar wahrnehmen können: die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung.

### 1.2.2 Gravitation

Die Gravitation kennen wir als die Kraft, mit der uns die Erde anzieht und die allen Dingen ihr Gewicht verleiht. Wir wissen, dass sie

die Bewegungen der Planeten um die Sonne und des Mondes um die Erde regelt. Wenn wir Wasser aus einem Staudamm auf eine Turbine leiten, dann nutzen wir die potenzielle Energie des Wassers im Gravitationsfeld der Erde, die die Sonnenwärme durch Verdunstung des Oberflächenwassers und Transport in große Höhen in der Atmosphäre mit anschließendem Regen geliefert hat. Trotz ihrer großen Bedeutung ist die Gravitation die schwächste aller Wechselwirkungen, die die Physik kennt.

Auch die Nutzung von Gezeitenenergie ist mit der Gravitation, diesmal mit der Anziehungskraft des Mondes und der Sonne verbunden. Zunächst sieht man rasch ein, dass sich auf der dem Mond zugewandten Seite wegen der Anziehungskraft des Mondes ein Wellenberg bildet, aber warum geschieht das in fast gleicher Höhe auch auf der gegenüberliegenden Seite der Erde? Dazu muss man das Gesamtsystem Erde-Mond betrachten, das sich um seinen Schwerpunkt dreht, der wegen der geringen Masse des Mondes innerhalb der Erde, aber vom Mond aus gesehen weit vor ihrem Mittelpunkt liegt. Auf der dem Mond zugewandten Seite übersteigt die Mondanziehung die von der Rotation erzeugte Fliehkraft, die das Wasser auf die entgegengesetzte Seite der Erde drückt, auf der dem Mond abgewandten Seite ist es genau umgekehrt [8, S. 197]. Die Sonne erzeugt einen etwa halb so großen Tidenhub. Je nachdem, ob sich die beiden Effekte verstärken oder kompensieren, spricht man von Springflut oder Nippflut.

Auf dem offenen Meer beträgt der Tidenunterschied nur rund 1 m; erst in Küstennähe können sich durch die Topographie höhere Werte einstellen. Sehr hohe Tidenunterschiede von 10–12 m, wie sie an verschiedenen Stellen der Welt vorkommen und sich dann auch für eine Nutzung als Energiequelle eignen, entstehen durch Resonanz, wenn die Schwingungsfrequenz des Wassers in einer Bucht mit der des Tidenhubs übereinstimmt [8, S. 179 ff.]. Die Gezeitenenergie steht zwar auch nicht bedarfsgerecht zur Verfügung, aber anders als andere erneuerbare Energien schwankt sie genau vorhersehbar im Rhythmus von 12 h und 25 min. Erneuerbar ist die Gezeitenenergie, wenn man es genau nimmt, nicht. Denn die Reibungsverluste der Gezeitenströme, wozu auch ein Gezeitenkraftwerk beitragen würde, gehen zu Lasten der Rotationsenergie der Erde: Der Erdtag verlängert sich jedes Jahr um 16  $\mu$ s. Der Mond dagegen wird beschleunigt und entfernt sich jedes Jahr um 4 cm von der Erde.

Von allen Energieformen ist die Gravitation den Menschen am besten vertraut, weil die meiste Arbeit, die Menschen mit ihrer Muskelkraft leisten, gegen die Gravitationskraft gerichtet ist. Allerdings ist einfaches Gehen oder das Tragen eines Koffers auf gleicher Höhe physikalisch gesehen keine Arbeit, weil sich die Position im Schwerfeld der Erde nicht verändert. Dass wir trotzdem dabei ins Schwitzen kommen können, liegt an den Kontraktionen, die unsere Muskeln auch dann ausführen, wenn sie etwas auf der gleichen Höhe halten. Beim Radfahren merkt man aber, dass die anfängliche Beschleunigung mehr Energie kostet als die Fortbewegung in der Ebene, wo nur der Luftwiderstand und die Rollreibung der Reifen und Radnaben ausgeglichen werden müssen. Und der Sattel erspart es uns, mit Muskelkraft ständig unser Gewicht gegen die Schwerkraft der Erde auf gleicher Höhe zu halten. Das Fahrrad ist deshalb eine geniale Erfindung, übrigens aus der Not geboren; denn Freiherr von Drais suchte in Karlsruhe nach einem Fortbewegungsmittel als Ersatz für Pferde, die während der Hungersnot um 1820 rar geworden waren, weil es an Futter mangelte. Auslöser dieser Hungersnot war eine Klimaver schlechterung infolge des Ausbruchs des Vulkans Tambora im Jahre 1815, dessen Aschepartikel die Sonne abschatteten. Sie sorgten noch lange für ein intensives Abendrot, wie es William Turner seinem, auf dem Titel dieses Buches wiedergegebenem Gemälde im Jahre 1838 als Götterdämmerungskulisse, aber doch realistisch eingefügt hat.

### 1.2.3 Elektromagnetische Energie

Die elektromagnetische Energie kommt in verschiedenen Formen vor, als elektrischer Strom, der z. B. einen Elektromotor antreibt, oder als Energie elektromagnetischer Wellen, die sich über die Erde ausbreiten und dabei Energie und Informationen transportieren.

Alle Energien, die wir auf der Erde nutzen, mit Ausnahme der nuklearen, der Geothermie und der Gezeiten, verdanken wir der elektromagnetischen Strahlung der Sonne. Besonders wichtig ist davon der kleine Ausschnitt des sichtbaren *Lichts* mit Wellenlängen von etwa einem halben Mikrometer, in dem das Maximum der Sonnenstrahlung bei der von unserem Auge als Grün wahrgenommenen Wellenlänge liegt. Das ist auch der Grund dafür, dass Pflanzen überwiegend grüne Blätter oder Nadeln haben; die Evolution hat sie für die Aufnahme

der maximalen Sonnenstrahlung bei der Energieumwandlung durch Photosynthese optimiert.

Max Planck hat entdeckt, dass das vermeintlich kontinuierliche Licht, also die elektromagnetische Strahlung, aus Lichtquanten besteht. Diese *Photonen* haben entsprechend ihrer Wellenlänge bzw. »Farbe« eine genau definierte Energie von einigen Elektronenvolt (eV). Alle Körper senden elektromagnetische Strahlung aus, auch wenn wir das nur in einem sehr kleinen Ausschnitt der Wellenlängen sehen können. Fühlen können wir aber die Wärmestrahlung eines Heizkörpers, die wesentlich längere Wellenlängen hat als das Licht (Abschnitt 1.2.8).

Die Photosynthese [9] ist der wichtigste Prozess für das Leben auf der Erde, und zwar in doppelter Weise: Er verwandelt das Verbrennungsprodukt  $\text{CO}_2$  wieder in Sauerstoff zurück und erlaubt das Wachstum der Pflanzen, die die Grundlage der gesamten Ernährung aller Lebewesen bilden. Dieser so elementar wichtige Prozess ist aus technischer Sicht merkwürdig unvollkommen. Aufgabe der Photosynthese ist die Herstellung von Kohlehydraten zum Aufbau der Biomasse der Pflanzen aus dem in der Luft enthaltenen  $\text{CO}_2$  und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Sie schafft das durch Spaltung des Wassermoleküls in Wasserstoff, den sie zur Reduktion des  $\text{CO}_2$  benutzt, und in Sauerstoff, den sie selbstlos an die Umgebungsluft abgibt. Im Wassermolekül sind die beiden Wasserstoffatome mit dem Sauerstoffatom relativ fest verbunden; auch wer im Chemieunterricht selten aufgepasst hat, erinnert sich an die Knallgasreaktion, mit der sich Wasserstoff und Sauerstoff, als Gase vermischt, effektiv verbinden. Um die Bindungsenergie von 5,7 eV rein thermisch wieder aufzubrechen, muss man Wasser auf über 2500 °C erhitzen. Wie schafft es ein zartes Blatt einer Pflanze, das Wassermolekül mit Hilfe des sichtbaren Lichts aufzubrechen, dessen Photonen knapp die Hälfte der Bindungsenergie des Wassers »mitbringen«, nämlich 2 eV (rotes Licht) bis 3,2 eV (violette Licht)? In einem sehr komplexen Prozess werden in den sogenannten »Lichtreaktionen« Zwischenprodukte gebildet (NADPH und ATP), wozu insgesamt neun der freigesetzten Elektronen benötigt werden. Von der auf diese Weise eingesammelten Energie von 27,8 eV (bei violettem Licht) bzw. 15,8 eV (bei rotem Licht) enthalten diese Produkte aber nur noch jeweils die benötigten 5,8 eV; der Wirkungsgrad dieses ersten Prozessschrittes beträgt also nur 20–37%. In den nachfolgenden »Dunkelreaktionen« werden diese Stoffe in ei-



nem katalytischen Prozess mit einem Enzym weiterverarbeitet, wobei das Enzym merkwürdigerweise nicht zwischen  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  unterscheiden kann. Man stelle sich einen technischen Prozess vor, bei dem im entscheidenden Verfahrensschritt nicht zwischen Ausgangsmaterial und Produkt unterschieden werden kann – die Natur geht seltsame Wege. Dadurch verursachte störende Nebenprodukte und der Eigenbedarf der Pflanze an Energie für Atmung und Biosynthese führen dazu, dass sich der Wirkungsgrad weiter auf schließlich nur noch rund 1% erniedrigt. Auf diesem technisch unvollkommenen Prozess, der jedem Chemie-Verfahreningenieur die Haare zu Berge stehen lässt, beruht alles Leben auf der Erde; offensichtlich war dieses Ergebnis der Evolution ausreichend gut. Er reicht ja auch aus, den Sauerstoffgehalt der Atmosphäre stabil zu halten. Auch hat er es ermöglicht, dass sich aus Resten von Pflanzen unter Luftabschluss über Jahrtausende große Mengen an fossilen Energiequellen, an Kohle, Erdöl und Erdgas gebildet haben, in denen ein Teil der Sonnenenergie aus früheren Zeiten gespeichert ist. Die Tatsache aber, dass nur 1% der Lichtenergie, die auf eine vollständig bepflanzte Fläche fällt, überhaupt in Biomasse umgewandelt werden kann – in der Praxis sind es meist weniger als 0,2% – ist das prinzipielle Problem, mit dem jeder Versuch behaftet ist, durch »Energiepflanzen« einen Teil unseres Energiebedarfs zu decken (Abschnitt 4.2.4).

*Photovoltaische Zellen* können sichtbares Licht direkt in elektrischen Strom verwandeln. Um diesen Prozess zu verstehen, muss man wissen, dass die Physiker schon vor etwa 100 Jahren zu ihrer Überraschung feststellen mussten, dass das eindeutig aus elektromagnetischen Wellen bestehende Licht auch die Eigenschaft von Teilchen haben kann. Umgekehrt kann man nachweisen, dass auch Elementarteilchen, Atome, sogar große Moleküle Welleneigenschaft haben können. Das kann man sich eigentlich nicht vorstellen, aber darauf nimmt die Natur leider keine Rücksicht. Ein Lichtquant mit der Energie des sichtbaren und ultravioletten Lichts kann ein Elektron aus der Hülle eines Atoms sozusagen herausschießen. Passiert das in einem elektrisch leitenden oder isolierenden Material, so findet sich so ein Elektron bald wieder brav bei einem auf diese Weise »ionisierten«, also durch Verlust eines Elektrons positiv geladenen Atom ein. In einem *Halbleiter*, wie z. B. entsprechend behandeltem Silizium, findet das Elektron aber nicht mehr zurück, es wird in eine andere Schicht katapultiert, sozusagen in eine andere Etage, aus



**Abb. 1.15** Photovoltaische Kollektoren auf dem Turm einer Kirche in Berlin-Buch.

welcher der Rückweg versperrt ist. So kann in geeigneten Materialien durch die Bestrahlung mit Sonnenlicht eine dauerhafte Trennung von Ladungsträgern erreicht und damit eine Stromquelle realisiert werden. Während bei thermischen Umwandlungsverfahren die Sonnenwärme in Dampf verwandelt wird, der über eine Turbine einen Generator antreibt, kommt die elegante Photovoltaik ohne bewegliche Teile aus. Ihr Wirkungsgrad ist aber leider viel schlechter, denn selbst die besten Zellen schaffen selten mehr als 20 % des Lichts in Strom zu verwandeln, bei den meisten kommerziellen Produkten liegt der Wirkungsgrad unter 15 %. Dennoch sind sie zur Ikone des Aufbruchs in eine nachhaltige Energiezukunft geworden (Abb. 1.15).

Oberhalb des sichtbaren Lichtes, bei Wellenlängen von einigen Mikrometern, liegt die Infrarotstrahlung, die Wärmeenergie überträgt. Die Infrarotstrahlung sorgt in Verbindung mit dem Treibhauseffekt der Atmosphäre (siehe Abschnitt 2.2) dafür, dass auf dem größten

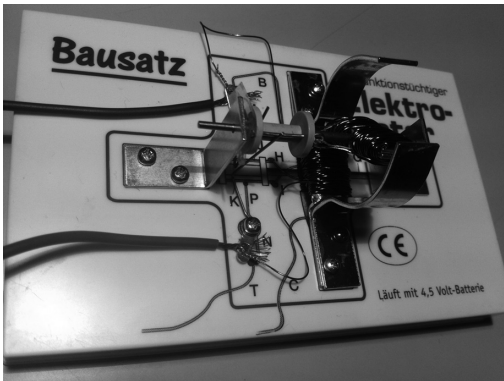
Teil unseres Planeten Wasser flüssig und damit Leben möglich ist. Noch längerwellige Strahlung mit Wellenlängen im cm-Bereich kann man zur Energieübertragung nutzen, weil diese Strahlung bei der Wahl der geeigneten Wellenlänge Resonanzschwingungen in Molekülen anregen kann, die zu einer Erwärmung des Materials führen. So funktionieren die Mikrowellenherde, aber auch die millionenfach stärkeren Gyrotrons, mit denen das Plasma eines Fusionsreaktors auf Betriebstemperatur vorgeheizt werden soll. Noch größere Wellenlängen im Bereich von Metern nutzen wir zur Übertragung von Informationen für Fernsehen, Radio, Internet und Mobiltelefonie.

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist aber auch für die gesamte Chemie verantwortlich, denn es sind die Elektronen der Atomhüllen, welche die chemischen Bindungen eingehen. Wie stark diese Kraft im Verhältnis zur Gravitation ist, soll ein Gedankenexperiment verdeutlichen: Wir stellen uns einen Klumpen Kohle von 1 kg Masse vor. Würde er uns aus einem Meter Höhe auf den Fuß fallen, wäre das eine unangenehm intensive Kollision. Bei diesem Fall würden 10 J an potenzieller Energie zunächst in kinetische und, nach dem Aufprall, in Wärme umgewandelt. Im Gegensatz zum Aufprall spürt man die Wärmeentwicklung nicht, sie liegt bei einem Tausendstel °C. Verbrennt man aber den Kohleklumpen, so setzt dies 30 Mio. J als Wärme frei: Die elektromagnetische Kraft ist millionenfach stärker als die Schwerkraft der Erde. An diesem Vergleich von kinetischer Bewegungsenergie des Kohleklumpens und seinem chemisch nutzbaren Energieinhalt sieht man unmittelbar, welche große Energiemengen in chemischer Form gebunden werden können. Hier liegt der Grund dafür, dass heute ein Auto mit einer Tankfüllung bis zu 1000 km zurücklegen kann, eine bislang konkurrenzlos leistungsfähige Form der Energiespeicherung. Man kann die chemische Bindungsenergie auch als potenzielle Energie verstehen. Je stärker Atome in einem Molekül gebunden sind, desto niedriger ist das Energieniveau. Bei der Verbrennung des Kohlebrockens setzt die Verbindung von einem Kohlenstoff- und zwei Sauerstoffatomen Energie in Höhe von 4 eV frei. Die gleiche Energie muss man aufwenden, wenn man die Atome wieder trennen will.

»Elektromagnetisch« heißt diese Kraft, weil sich ihre beiden Erscheinungsformen, Elektrizität und Magnetismus gegenseitig bedingen und hervorbringen. Durch eine Änderung eines elektrischen Stroms, auch durch eine Richtungsänderung z. B. in einer kreisfö-

migen Spule, wird ein Magnetfeld erzeugt, umgekehrt induziert ein sich änderndes Magnetfeld in einem elektrischen Leiter einen Strom. Für unser Stromnetz nutzen wir sogenannten Wechselstrom, dessen Spannung 50-mal pro Sekunde sinusförmig zwischen plus und minus 220 V schwankt. Der davon erzeugte Strom in einem Leiter wird deshalb 100-mal in der Sekunde ein- und ausgeschaltet. Bei einer Glühbirne kann man das nicht sehen, weil der Glühfaden thermisch zu träge ist, aber bei einer Gasentladung, z. B. in einer sogenannten »Neonröhre«, kann man das Flackern wahrnehmen, wenn man die Lampe fixiert und dabei den Kopf schüttelt. In vielen Geräten, z. B. im Elektroherd, spielt dieses Flackern des Stromes keine Rolle, in anderen vor allem bei Elektromotoren, nutzt man diesen Effekt bewusst aus. Der wesentliche Vorteil des Wechselstroms liegt aber darin, dass man seine Spannung durch Transformatoren leicht ändern kann. Ein *Transformator* besteht aus zwei Spulen mit unterschiedlich vielen Windungen, die um einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Fließt durch die eine Spule ein Wechselstrom, so erzeugt dieser in dem Eisenkern ein wechselndes Magnetfeld, das in der anderen Spule wieder einen Wechselstrom erzeugt. Entsprechend dem Verhältnis der Windungszahlen kann man sich an der zweiten Spule eine höhere oder niedrigere Spannung abholen. Da die elektrische Leistung durch das Produkt von Spannung und Stromstärke bestimmt wird, korrespondieren hohe Spannungen mit geringen Stromstärken und umgekehrt.

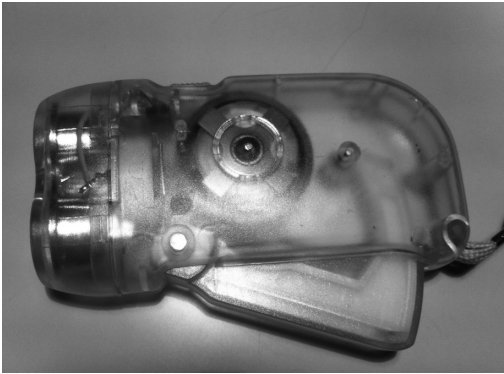
Eine der wichtigsten elektromagnetischen Maschinen ist der *Elektromotor* (Abb. 1.16), der für zahlreiche Funktionen zu einem unentbehrlichen Begleiter der Menschen geworden ist. Er besteht aus einem Stator und einem Rotor. Im fest stehenden Stator wird in einem ringförmigen Eisen durch Strom ein Magnetfeld erzeugt. Das Gleiche geschieht über gleitende Kontakte auch im drehbaren Rotor. Der Rotor dreht sich, um die entgegengesetzten magnetischen Pole von Stator und Rotor einander so nahe wie möglich zu bringen. Die Spule des Rotors besteht aber aus mehreren Segmenten, die durch die Schleifkontakte nacheinander mit Strom versorgt werden, bevor der Pol des Rotors sein Ziel erreicht hat. So dreht er sich immer weiter, wie ein Hund einer an einem Strick vor ihm hergezogenen Wurst folgt. Natürlich ist die Technik inzwischen ungeheuer verfeinert, viele verschiedene Motortypen sind für unterschiedliche Anwendungen optimiert worden. Der Elektromotor ist eine der effizien-



**Abb. 1.16** Einfacher Elektromotor; man erkennt unten die Windung des Stators, der in den runden Blechen ein Magnetfeld erzeugt, sowie den Rotor mit zwei Segmenten, die über Schleifkontakte abwechselnd mit Strom durchflossen werden.

entesten Maschinen überhaupt, sein Wirkungsgrad liegt über 90 %, die allerbesten Motoren erreichen 97 %. Anders als bei Benzin- und Dieselmotoren, die ihr höchstes Drehmoment bei einigen Tausend Umdrehungen pro Minute erreichen, entwickelt der Elektromotor seine größte Kraft aus dem Stillstand heraus. Mit einem Elektroauto kann man an der Ampel deshalb auch PS-starke Sportwagen ziemlich alt aussehen lassen. Dafür muss man im Winter entweder frieren oder durch Heizung mit der Batterie eine deutliche Verringerung der Reichweite in Kauf nehmen, weil der so extrem effiziente Motor praktisch keine Abwärme erzeugt. Beim *Generator* (Abb. 1.17) wird das Prinzip umgekehrt: Der Rotor wird im Kraftwerk durch die Turbine, im Auto vom Motor über einen Keilriemen (Lichtmaschine), beim Fahrrad-»Dynamo« durch Reifenkontakt oder bei einer Dynamo-Taschenlampe von Hand angetrieben und erzeugt elektrischen Strom.

Für die Regelung des Transports von elektrischem Strom gibt es Leiter, in denen der Strom fließt, z. B. Kupfer und andere Metalle, und Isolatoren, die der Strom nicht überwinden kann, z. B. Porzellan, die dann als Träger elektrischer Leitungen benötigt werden. Dazwischen gibt es noch sogenannte *Halbleiter*, die in verschiedenen Schichten des Materials beide Funktionen vereinen; sie haben sich in miniaturisierter Form als die idealen Schaltelemente für die Informations- und



**Abb. 1.17** Einfache Generator-Taschenlampe; über ein Zahnrad wird der ringförmige Rotor in Bewegung gesetzt, der im Inneren des Stators Strom erzeugt.

Kommunikationstechnik erwiesen. Auch in einem Leiter muss der Strom einen *Widerstand* überwinden, der in Ohm gemessen wird. Er führt zur Erwärmung des Materials, was man für technische Anwendungen z. B. in Elektroheizungen oder Kochplatten nutzen kann; für die Energieübertragung sind die dadurch auftretenden Verluste aber unerwünscht. Reduzieren lassen sich die Verluste, wenn man das für die elektrische Leistung maßgebliche Produkt von Spannung und Stromstärke variiert; je höher die Spannung, desto geringer muss die Stromstärke bezogen auf die gleiche Leistung sein. Verluste durch den Ohm'schen Widerstand sind proportional zum Quadrat der Stromstärke und unabhängig von der Spannung. Deshalb kann man durch *Hochspannungsleitungen* besonders verlustfrei Strom transportieren. Bei Wechselstromübertragung sind die Ohm'schen Verluste geringer als bei Gleichstrom, dafür entsteht durch Kapazität und Induktivität des Leiters ein zusätzlicher »Blindwiderstand«. Heute werden Fernleitungen mit Wechselstrom bei maximal 380 000 V betrieben. Der Wunsch, zu noch höheren Spannungen überzugehen, um die Leitungsverluste zu vermeiden, findet seine Grenze durch die Gefahr von Überschlägen auf die Erde bei feuchter Luft, was man nur durch wesentlich aufwändigere Mastkonstruktionen vermeiden könnte. Für große Leistungsübertragungen hat sich in den letzten Jahren die *Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung* durchgesetzt, bei der Gleichstrom bei ca. 1 Mio. V in einem Kabel im Ergebnis deut-

lich verlustfreier transportiert werden kann. Fast ganz lassen sich die Ohm'schen Verluste bei sehr niedrigen Temperaturen vermeiden. Den als *Supraleitung* bekannten Effekt kann man sich analog zu einer Autobahn vorstellen, auf der die Elektronen in einer sehr geordneten Leiterstruktur ungehindert verkehren können. Fast alle Leiter werden nahe dem absoluten Nullpunkt ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) supraleitend, einige Materialien schaffen es auch bereits bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### 1.2.4 Kernenergie

Die Physiker kennen noch zwei weitere Kräfte – oder wie sie sagen – »Wechselwirkungen«, die sie, etwas phantasielos, die starke und die schwache Wechselwirkung getauft haben.

Die schwache Wechselwirkung ist für die Energietechnik nicht zu gebrauchen. Wir können sie aber nicht unerwähnt lassen, da sie für den radioaktiven Zerfall und damit für die problematische Nebenwirkung der Kernenergie verantwortlich ist. Umso wichtiger ist die starke Wechselwirkung, weil sie es ist, die »die Welt im Innersten zusammenhält«. Sie sorgt dafür, dass die aus neutralen Neutronen und positiv geladenen Protonen bestehenden Kerne der Atome trotz der gegenseitigen elektromagnetischen Abstoßung der Protonen zusammengehalten werden. Damit sie das leisten kann, ist die starke Wechselwirkung wiederum millionenfach stärker als die elektromagnetische, aber sie hat nur eine extrem kurze Reichweite. Die Elektronen, die den Kern umkreisen wie die Planeten unsere Sonne, spüren nichts mehr von ihr.

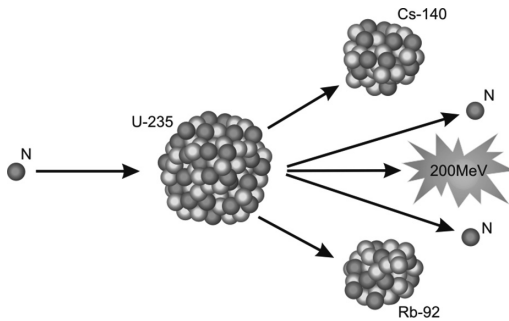
##### 1.2.4.1 Kernspaltung

Um die Wirkung der starken Wechselwirkung auf den Aufbau der Atomkerne zu verstehen, benutzen Physiker gern das Bild einer Elefantenherde [8, S. 224 ff.], deren Zusammenhalt umso besser ist, je mehr Elefanten sich mit ihren Rüsseln berühren können. Die Elefanten sind Symbol der besonderen Stärke der Kraft, der Rüssel das ihrer begrenzten Reichweite. Die Elefantenherde besteht aus streitbaren Bullen, die möglichst großen Abstand halten (den Protonen) und friedlichen Kühen (den Neutronen). Wie auch immer es bei einer echten Herde sein mag, bei unserer berühren sich die meisten

Rüssel, wenn die Herde etwa 40–80 Tiere zählt, darunter etwa gleich viele Bullen und Kühe. Im periodischen System der Elemente liegt diese Zone größter Stabilität etwa zwischen Kalium und Brom. Das ist der Grund, warum man bei der Fusion kleiner und bei der Spaltung großer Kerne – Pardon! Herden – Energie gewinnen kann. In der Sonne gibt es ein kompliziertes Spiel von unterschiedlich kleinen Gruppierungen, bei dem am Ende – hier hinkt unser Herden-Beispiel leider – aus vier Bullen (Protonen = Wasserstoffkernen) eine Miniherde aus je zwei Bullen und zwei Kühen (Helium) entsteht. Dabei wird eine Energie von 26 Mio. eV (MeV) freigesetzt. Auf der Erde lässt sich dies so nicht nachmachen, weil in der Sonne wegen ihrer Masse durch Gravitation eine viel größere Dichte herrscht. Deshalb versucht man, das gleiche Endprodukt aus der Verbindung von einem Elefantenpärchen (Deuterium = schwerer Wasserstoff) und einem Trio (Tritium) zu realisieren. Dabei wird immerhin auch eine Energie von 17,6 MeV gewonnen. Außerdem bleibt eine Elefantenkuh übrig, die sich irgendwelchen Herden in der Umgebung anschließt, die daraufhin in große Erregung geraten (die Neutronen aktivieren das Material, aus dem der Fusionsreaktor besteht). Oberhalb der Zahl von 80–100 Tieren nimmt die Bindungsenergie in den Herden langsam ab, sie sind nur zusammenzuhalten, wenn ihnen mehr Kühe als Bullen angehören.

Atomkern-Herden mit gleich vielen Bullen und unterschiedlich vielen Kühen nennt man Isotope. Die Zahl der Bullen bestimmt den Namen, chemisch sind Isotope nicht unterscheidbar; die Zahl hinter dem chemischen Symbol kennzeichnet die Herdengröße. Die größte Herde, die (noch) auf der Erde vorkommt, Uran (U) hat 92 Bullen. Früher, näher am Urknall, gab es noch größere, aber die sind längst zerfallen; im Zoo (Labor) kann man sie in winzigen Mengen für kurze Zeit wieder züchten. Die Stabilität ist nicht allein von der Zahl der Tiere abhängig, sondern von der Art der Untergruppierungen: So ist eine Herde von 92 Bullen mit 146 Kühen ( $U_{238}$ ) stabiler als mit nur 143 Kühen ( $U_{235}$ ). Schlendert nämlich zu dieser Herde mit 235 Tieren eine weitere Kuh dazu, man kann sich ja eine besonders attraktive vorstellen, so entzweit sich die Herde; sie zerfällt in zwei mittelgroße neue Herden (Abb. 1.18). In diesen Herden finden aber nicht alle Kühe eine Heimat, weil kleinere mit weniger Überschuss an Kühen auskommen, es bleiben also einige Kühe als Einzelgängerinnen übrig, die wieder andere Herden zur Spaltung bringen können (das ist die





**Abb. 1.18** Spaltung des U<sub>235</sub>-Kerns in zwei Spaltprodukte.

Kettenreaktion). Diese Kühe kann ein Dompteur übrigens beeinflussen und damit die Kettenreaktion steuern. Außerdem herrscht in den neuen Herden natürlich große Aufregung; es kann lange dauern, bis sich die Erregung gelegt hat (die Spaltprodukte sind radioaktiv). Eine der Einzelgänger-Kühe kann sich auch der stabilen Herde mit 238 Kühen anschließen; die spaltet sich dann nicht, sondern nimmt die Kuh auf, wandelt sie aber dabei in einen Bullen um. Hier hinkt unser Vergleich wieder. Die neue Herde mit 93 Bullen und 146 Kühen (Pu<sub>239</sub>) reagiert auf die nächste eintreffende Kuh erneut durch Spaltung und Freisetzung überzähliger Kühe. Auch hier sollte die Kuh »schlendern«, sie kann viel besser in die Herde eindringen, wenn sie nicht zu schnell ist (die Neutronen müssen moderiert werden, sie haben dann normale Geschwindigkeiten, wie bei der Wärmebewegung; deshalb spricht man von »thermischen« Reaktoren).

Eine Ausnahme bildet die Herde mit 92 Bullen und 146 Kühen (U<sub>238</sub>), sie kann nur von einer Kuh gesprengt werden, die vorher mächtig Anlauf genommen hat (deshalb spricht man dann von »schnellen« Reaktoren). Auch in einigermaßen reinem U<sub>235</sub> oder Plutonium 239 (Pu<sub>239</sub>) schaffen es die schnellen Kühe, eine Kettenreaktion auszulösen, wenn die Masse groß genug ist. Diese »kritische Masse« beträgt für fast reines U<sub>235</sub> (bei einer Anreicherung dieses Isotops auf 94%) 51 kg, für reines Pu<sub>239</sub> 15 kg. Wird eine solche Menge erreicht oder überschritten – und das ist in einigen Fällen in nuklearen Versuchsanlagen vorgekommen – dann zerlegt sich die Masse unter Aussendung radioaktiver Strahlung mittels einer Leistungsexkursion, die das Labor zerstören und Umstehenden eine starke Strahlendosis zufügen kann. Aber das ist noch keine »Atomex-

plosion«. Für den Bau einer Atombombe ist es wichtig, dass die Masse nicht sofort auseinanderfliegt, sondern trotz der Wärmeentwicklung so lange zusammenbleibt, bis die Kettenreaktion einen möglichst großen Teil des Materials erfasst hat. Leider kann man im Internet genau nachlesen, was man machen muss, um eine Atombombe zu bauen.

Natürlich ist es wesentlich einfacher, eine Bombe zu bauen, die einmal explodieren soll, als einen Reaktor, der 40 Jahre lang zuverlässig Strom erzeugt. Der Engpass ist immer der Zugang zu hochangereichertem U<sub>235</sub> oder reinem Pu<sub>239</sub>, beides ist so schwer herzustellen, dass es für terroristische Gruppen unmöglich sein dürfte, eine Atombombe zu bauen, es sei denn, sie hätten Zugang zu militärischem Material. Für Staaten ist es natürlich kein Problem, entweder eine Anreicherungsanlage zur Herstellung von U<sub>235</sub> oder eine Wiederaufarbeitungsanlage zur Abtrennung von Pu<sub>239</sub> zu errichten. Dass dies bisher nur wenige getan haben, liegt an dem *Vertrag zur Nichtverbreitung von Atomwaffen* (NVV), dem 190 Staaten beigetreten sind. In diesem Vertrag haben sich die 1968 bestehenden Kernwaffenstaaten, die USA, Russland, Großbritannien, Frankreich und China, zur nuklearen Abrüstung verpflichtet, während der Rest der Welt auf Atomwaffen verzichtet, dafür aber das Recht hat, die Kernenergie für friedliche Zwecke zu nutzen. Diese »Nicht-Kernwaffenstaaten« unterwerfen sich der Überwachung durch die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) in Wien, eine Organisation der UNO-Familie, die mit Hilfe der sogenannten *Spaltstoff-Flusskontrolle* die missbräuchliche Verwendung von Anlagen und Materialien feststellen kann. Obwohl damit die Rechte und Pflichten zwischen Habenden und Nichthabenden ziemlich unausgewogen und obwohl die Kernwaffenstaaten ihrer Verpflichtung zur nuklearen Abrüstung kaum nachgekommen sind, war der Vertrag bisher ziemlich erfolgreich, denn seit 1968 sind nur Indien und Pakistan, Nordkorea und wahrscheinlich Israel als neue Kernwaffenbesitzer dazu gekommen.

Mit den heute in der Natur vorkommenden Materialien kann man keine sich selbst erhaltende Kettenreaktion erreichen – nicht mehr. Aber vor 2 Mrd. Jahren, als der Anteil des U<sub>235</sub> noch bei 3 % lag (die Halbwertszeit beträgt 700 Mio. Jahre) gab es im heutigen Gabun insgesamt 17 »natürliche Reaktoren«. Immer wenn es regnete und Wasser als Moderator in die natürliche Uranlagerstätte eindrang, fing der Reaktor an, Wärme zu erzeugen, bis das Wasser verdampfte; dann

ging er wieder aus, um von Neuem zu beginnen, wenn wieder Wasser nachgelaufen war. Über 500 000 Jahre waren diese Naturreaktoren in Betrieb. Heute muss man das  $U_{235}$  künstlich auf mindestens 3–5 % anreichern, wenn man einen Reaktor mit normalem Wasser als Moderator betreiben möchte. Die Trennung von  $U_{235}$  und  $U_{238}$  ist schwierig, weil die Massendifferenz so klein ist. Zunächst hat man ein Diffusionsverfahren entwickelt, das den Effekt ausnutzt, dass das kleinere Isotop etwas leichter durch eine Membran wandert als das schwere. Aber es bedarf schon mehr als tausend Durchgänge, die einen enormen Energieverbrauch verursachen, um das  $U_{235}$  auf einen Anteil von 3 % zu steigern. Heute setzt man überwiegend *Gasultrazentrifugen* ein, in denen gasförmiges Uran-Hexafluorid mit sehr hohen Geschwindigkeiten rotiert; durch die Zentrifugalkraft reichert sich das schwere Isotop außen und das leichtere innen an. Diese Technik wurde im Rahmen eines trilateralen Abkommens, das auch die Geheimhaltung der Technologie regelt, zwischen Deutschland, Großbritannien und den Niederlanden seit 1970 von dem trinationalen Konsortium URENCO entwickelt. Nach dem Bau von Anreicherungsanlagen in Gronau (Deutschland), Capenhurst (Großbritannien) und Almelo (Niederlande) wurde diese Entwicklung bald so erfolgreich, dass die URENCO Deutschland die erhaltenen staatlichen Forschungsmittel ab 1987 voll zurückzahlen konnte, ein extrem seltenes Ereignis in der deutschen Forschungspolitik.

Große öffentliche Aufmerksamkeit erlangte die Zentrifugentechnologie in Zusammenhang mit dem Atomprogramm des Iran. Die dortige Eigenentwicklung, die wahrscheinlich auf Spionageerkenntnissen aus einem früheren Stand der Technik aufbaut, ist sicher weit weniger effektiv als die der URENCO, aber immer noch ausreichend, um größere Mengen angereichertes Uran zu produzieren. Nach dem NVV hat der Iran grundsätzlich durchaus das Recht, Anreicherungsanlagen zur Versorgung seiner Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren zu errichten und zu betreiben. Dass dabei nicht nur eine normale Anreicherung auf maximal 5 %, sondern auf bis zu 20 % geplant ist – angeblich, um damit einige Forschungsreaktoren zu versorgen, weckt jedoch international Verdacht. Eine Anreicherung von 5 % oder 20 % ist nicht so fern von einer Hochanreicherung auf 95 %, wie man meinen könnte: Da die ersten Schritte der Anreicherung von den natürlichen 0,7 %  $U_{235}$  aufwärts die aufwändigsten sind, ist bei 3 % schon ein Drittel und sind bei 20 % mehr als zwei Drit-

tel der Anreicherungsarbeit auf 95 % geleistet. Bedenken weckt auch, dass sich für den bisher geringen Bedarf des Iran an beiden Anreicherungsgraden eine eigene Anreicherungskapazität eigentlich wirtschaftlich nicht lohnt und vor allem, dass der Iran seinen Verpflichtungen zur Kontrolle der Anlagen durch die IAEO nicht ausreichend nachkommt.

Während des Betriebs reichern sich in den Brennstäben, die das angereicherte Uran enthalten, nach und nach Spaltprodukte an, hinzu kommen Plutonium und Trans-Plutonium-Elemente, die durch Neutroneneinfang entstehen. Wenn das  $U_{235}$  weitgehend verbraucht ist, müssen die Brennelemente ausgetauscht werden. Man kann sie einer *Wiederaufarbeitung* unterziehen und dabei die weiter nutzbaren Brennstoffe, das restliche Uran und das entstandene Plutonium abtrennen und für neue Brennelemente bereitstellen. Die radioaktiven Spaltprodukte werden dann in Glaskörpern eingeschmolzen, damit sie während der späteren Endlagerung möglichst resistent gegen Auslaugung sind. Wenn man auf die Wiederaufarbeitung verzichtet, muss man die abgebrannten Brennelemente, die ja für den Reaktorbetrieb und nicht für die *Endlagerung* optimiert sind, aufwändig konditionieren und in geeigneten Behältern einlagern; dies wird als direkte Endlagerung bezeichnet (Abschnitt 3.4.2).

Die nukleare Energie ist wiederum zehn bis hundert Mio. Mal stärker als die elektromagnetische, weshalb man aus geringen Mengen sehr viel Energie gewinnen kann. Bei einer Kernspaltung werden etwa 200 MeV freigesetzt, bei vollständiger Spaltung von 1 g natürlichen Urans entstehen 180 kWh [8, S. 227]; demnach reichen 15 g Uran, um eine Durchschnittsfamilie ein Jahr mit Strom zu versorgen.

Während der Fusionsprozess noch erforscht wird (Abschnitt 3.4.6), ist die Kernspaltung in den letzten 40 Jahren eine wichtige Energiequelle für viele Länder der Welt geworden (siehe Abschnitt 3.4.3). Die Kehrseite der so ergiebigen Technik ist das Entstehen großer Mengen an radioaktiven Stoffen, die für Mensch und Umwelt eine große Gefahr darstellen, wenn sie nicht zuverlässig eingeschlossen werden.

#### 1.2.4.2 Radioaktivität

Es gibt verschiedene Formen radioaktiver Strahlung. Die aus Kernumwandlungen stammenden Strahlen werden mit den ersten drei

Buchstaben des griechischen Alphabets (Alpha, Beta und Gamma) bezeichnet. Diese von Stoffen ausgehende Radioaktivität ist kein Dauerzustand, die Strahlung nimmt mit der Zeit exponentiell ab, also anfangs rasch und dann immer langsamer. Die Zeit, in der jeweils die Hälfte der Strahlenquelle zerfallen ist, die sogenannte Halbwertszeit, ist von Isotop zu Isotop sehr unterschiedlich. Dass wir heute noch natürliche Strahlungsquellen auf der Erde haben, liegt an der extrem langen Halbwertszeit von Kalium 40 ( $K_{40}$ ),  $U_{238}$  und Thorium 233 ( $Th_{233}$ ). Aber je weiter man in die Erdgeschichte zurückgeht, umso mehr radioaktive Stoffe gab es, auch die in Kernkraftwerken entstehenden Spaltprodukte hat es früher auf der Erde gegeben; ein unbestreitbarer Grund, weshalb es zwischen natürlicher und technisch bedingter Radioaktivität keinen Unterschied gibt.

Alphastrahlen bestehen aus energiereichen Heliumkernen. Man kann sie mit einem Blatt Papier abschirmen. Wenn Alpha-Strahler durch Einatmen, Ingestion oder über Verletzungen in den Körper eines Menschen gelangen, können sie Krebs auslösen. Betastrahlen sind energiereiche Elektronen; auch sie können normalerweise nicht in den Körper eindringen, aber bei höheren Dosen Verbrennungen der Haut verursachen. Gammastrahlen sind elektromagnetische Strahlen wie das Licht, aber wegen ihrer niedrigen Wellenlängen sehr viel »härter«. Der weichere Bereich der Gammastrahlen ist mit Röntgenstrahlen identisch. Wie Röntgenstrahlen können sie den Körper durchdringen und Schäden an Molekülen in den Zellen herbeiführen. In der Natur kommen diese Strahlen im Erdgestein und in der Nahrungskette vor. Die wichtigsten Quellen sind  $K_{40}$ ,  $U_{238}$  und  $Th_{233}$ . Den größten Beitrag zur natürlichen Strahlenbelastung des Menschen aus dem Untergrund liefert der Alphastrahler Radon, ein Zerfallsprodukt des  $U_{238}$ . Radon ist ein Edelgas, geht also keine chemischen Bindungen ein und ist deshalb leicht flüchtig. Es steigt in Konzentrationen, die je nach den geologischen Bedingungen stark variieren können, aus dem Boden auf und kann sich etwa in Kellerräumen sammeln, erreicht seine höchsten Konzentrationen aber in Bergwerken (Abschnitt 3.1).

Eine wichtige Quelle natürlicher Radioaktivität auf der Erde ist die kosmische *Höhenstrahlung*. Aus dem Weltraum treffen hochenergetische Protonen oder Atomkerne, am häufigsten Eisen-Kerne, auf die Erde; die Energien können dabei im Extremfall so groß sein, dass ein einziger winziger Atomkern mit der Energie eines scharf geschlagene-

nen Tennisballs ankommt. In der Atmosphäre lösen diese Strahlen einen Schauer von tausenden von Teilchen und Strahlungsquanten aus, die wie ein Gießkannenstrahl auf die Erdoberfläche prasseln.

In der Kerntechnik haben wir es hauptsächlich mit der Gammastrahlung der Spaltprodukte zu tun, gegen die beim Betrieb der Reaktoren und bei der Handhabung und Lagerung abgebrannter Brennelemente entsprechende Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Alphastrahlen kommen aus den sogenannten Trans-Uran-Elementen (sehr große, nicht stabile Elefantenherden), die bei Verzicht auf Wiederaufarbeitung auch in ein Endlager gelangen. Radioaktiv wird auch das Material eines Reaktors, das unmittelbar der Neutronenstrahlung ausgesetzt ist, weil darin durch Neutroneneinfang radioaktive Isotope entstehen. Deshalb muss man abgebrannte Brennelemente stark abschirmen und die Bearbeitung von Brennelementen, aber auch die Demontage des aktivierten Reaktorkerns fernhantiert ausführen.

Radioaktivität misst man in Becquerel (Bq): 1 Bq bedeutet einen Zerfall pro Sekunde. Früher hat man Radioaktivität lange in Curie (Ci) angegeben; 1 Ci ist die Strahlung, die 1 g Radium aussendet, das entspricht  $3,7 \times 10^{10}$  Bq. Der Wechsel der Maßeinheit hat gravierende psychologische Konsequenzen: Eine Aktivität, die früher in Mikrocurie ( $\mu$ Ci) angegeben wurde, muss nun in Megabecquerel (MBq) ausgedrückt werden. Um die Wirkung der Radioaktivität auf den Menschen zu bemessen, muss man zunächst berücksichtigen, welcher Teil der Strahlung vom Körper absorbiert wird. Diese Größe misst man als Energieverlust der Strahlung pro Kilogramm. Die Maßeinheit dafür ist ein Gray (Gy); 1 Gy entspricht der Energieaufnahme von 1 J/kg durch den Körper. Darüber hinaus muss man aber auch die biologische Wirksamkeit der Strahlung berücksichtigen und dabei die verschiedenen Wirkungsmechanismen der unterschiedlichen radioaktiven Strahlungen zu einem »Qualitätsfaktor« (QF) zusammenfassen, mit dem die in Gy gemessene Dosis multipliziert werden muss. Als Maß für die Strahlendosis wird heute Sievert (Sv) verwendet;  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{QF}$ .

Die Wirkung der radioaktiven Strahlung auf biologische Systeme beruht auf der Zerstörung von Molekülen, dabei können Schäden an der DNS auftreten oder Radikale freigesetzt werden, die die Zelle schädigen. Eine Dosis-Wirkungs-Relation kennt man nur von den Fällen, in denen Menschen sehr hohen Strahlendosen ausgesetzt waren. Den höchsten Strahlendosen über das ganze Arbeitsleben sind

Bergarbeiter in Uranminen ausgesetzt. Deren Belastung wurde zwischen den Jahren um 1920 und 1970 noch übertroffen von den Arbeitern, die durch den Auftrag radioaktiver Stoffe selbstleuchtende Uhrenzifferblätter herstellten und dabei den Pinsel häufig mit der Zunge anfeuchteten. Heute ist die Verwendung radioaktiver Stoffe in Uhren verboten. Die Wirkung einmaliger hoher Dosen kennt man von den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki und von dem Reaktorunfall in *Tschernobyl*. Aber auch in der Medizin, bei der Diagnose mit Röntgenstrahlen oder der Strahlentherapie von Krebs werden sehr hohe Dosen verabreicht. Aus Tschernobyl weiß man, dass ab 7 Sv die Strahlung innerhalb von Wochen zum Tod führt. Bei Dosen zwischen 3 und 5 Sv gilt das für die Hälfte der Opfer. Schon bei so hohen Dosen beginnt also der Bereich, in dem man die Wirkung medizinisch nicht kausal, sondern nur als statistische Wahrscheinlichkeit angeben kann. Die möglichen Folgen geringerer Strahlungsdosen kann man durch Extrapolation der Wirkung hoher Dosen errechnen. Dabei ist umstritten, wie weit man diese Extrapolation zu niedrigen Dosen treiben kann. Denn es ist durchaus plausibel, dass Körperzellen Strahlung unbeschadet überstehen könnten, wenn sie genügend Zeit für den Reparaturmechanismus haben; erst wenn bei höheren Dosen eine Zelle vor Abschluss der Reparatur erneut getroffen wird, würde es demnach gefährlich für den Bestand der Zelle. Sicherheitshalber unterstellt man in der Kerntechnik aber, dass es keinen Schwellenwert für radioaktive Strahlung gibt; auch kleine Dosen werden deshalb bei der Strahlenbelastung berücksichtigt.

Die Menschheit ist ständig einer natürlichen radioaktiven Belastung ausgesetzt: Sie beträgt in Deutschland im Durchschnitt 2,1 Millisievert (mSv), wozu die geologische Belastung 0,6 mSv, die Nahrungskette 0,1 mSv und die kosmische Strahlung auf Meereshöhe 0,3 mSv beiträgt; in 1500 m Höhe beträgt die Letztere aber bereits das Doppelte [8, S. 241]. Die natürliche Belastung variiert deshalb sowohl in Abhängigkeit von der Art des Untergrunds wie auch mit der Höhe des Wohnorts über dem Meeresspiegel. In Deutschland kann sie um mehr als einen Faktor zwei schwanken. Ein Beitrag von 0,3 mSv kommt aus dem natürlichen  $K_{40}$ , das sich in unserem eigenen Körper befindet; mit ihm bestrahlen wir auch ein wenig unsere Umgebung. Der Beitrag, den das aus dem Untergrund ausströmende Radon liefert, liegt im Mittel bei 1–1,5 mSv, kann aber auch mehr als 100 mSv betragen.

Unterstellt man eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung, die grob vereinfacht das Krebsrisiko pro Sievert um 10 % ansteigen lässt, so würden in Deutschland jährlich 20 000 Menschen an der natürlichen Strahlenbelastung sterben, darunter in Freiburg doppelt so viele wie in Bremen. Solche Unterschiede sind innerhalb der normalen Sterblichkeitsrate nicht festzustellen. Denn insgesamt sterben in Deutschland im Durchschnitt pro 1000 Einwohner elf Menschen pro Jahr, wobei die *Sterblichkeitsrate* regional großen Schwankungen unterliegt. So starben in den Jahren 2006–2008 jährlich pro 10 000 Einwohner in Baden Württemberg rund 10,6, in Mecklenburg-Vorpommern aber etwa 13 Menschen, wobei der Unterschied hauptsächlich auf verschiedene Altersstrukturen und Wanderungsbewegungen zurückzuführen ist. Aufgrund der demographischen Entwicklung erkrankt in Deutschland jeder Zweite an *Krebs*, der wiederum bei der Hälfte, d. h. genau bei 25,5 %, zum Tode führt.<sup>4)</sup> Epidemiologisch könnte man also nur große Veränderungen der Sterblichkeitsrate einer besonderen Belastung zuordnen. So ist selbst im Fall des bisher schlimmsten Nuklearunfalls in Tschernobyl jenseits der 50 Toten des unmittelbar im Reaktorbereich eingesetzten Personals nur eine regionale Steigerung von Schilddrüsenkrebserkrankungen festgestellt worden. Die statistisch mögliche Zahl von mehreren Tausend zusätzlichen *Krebserkrankungen* ist in der Sterblichkeits- oder der Krebsrate statistisch zumindest bisher nicht nachzuweisen. Für Deutschland ergibt sich rechnerisch durch die radioaktive Belastung aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl eine um 0,01 % erhöhte *Krebsrate*.

Aus der Energietechnik kommt der relativ größte Beitrag zur radioaktiven Belastung überraschenderweise aus den Kohlekraftwerken, die etwa 1 % beitragen, die Kernkraftwerke liefern im Normalbetrieb nur die Hälfte davon. Den höchsten Beitrag, der jedoch von Fall zu Fall stark schwanken kann, liefert die Medizin, entweder bei der Diagnose (Röntgenaufnahmen) oder der Therapie (Schilddrüsenkrebs, Angiographie). Hier sind Dosisleistungen bis zu 25 mSv normal, bei besonderen Therapien kann auch ein Vielfaches davon eingesetzt werden. Im Durchschnitt verdoppelt die Medizin die natürliche Strahlenbelastung.

4) [www.krebsinformationsdienst.de/grundlagen/krebsstatistiken.php](http://www.krebsinformationsdienst.de/grundlagen/krebsstatistiken.php), (25.02.2013).



### 1.2.5 Die Erhaltung der Energie

Wie auch immer Energie auftritt, als mechanische, chemische oder nukleare, als kinetische oder potenzielle Energie: In einem geschlossenen System bleibt die Summe aller Energien immer konstant. Dieser Energieerhaltungssatz ist eines der wichtigsten Gesetze der Physik. Deswegen verziehen Physiker schmerzhaft das Gesicht, wenn Politiker von Energie »erzeugung« sprechen, man kann Energie immer nur von einer in eine andere Form umwandeln. Salopp kann man diesen 1. Energiesatz auch mit »Von nichts kommt nichts« übersetzen. Abgesehen von atomaren und nuklearen Quantenprozessen sind Umwandlungen von einer Energieform in eine andere immer mit Verlusten verbunden, bei der mechanischen Energie geht immer ein Teil der geordneten kinetischen Bewegungsenergie (»Exergie«) in ungeordnete (»Anergie«) über, es entsteht Wärme. Dieser 2. Energiesatz lautet vereinfacht »Änderung kostet«. Die Summe von Anergie und Exergie bleibt konstant. Mit der Zeit geht alle Energie im Wärme über.

Es lohnt sich, über diese beiden Energiesätze noch etwas nachzudenken. Sie erscheinen wie die zwei Seiten einer Medaille: Dem Versprechen des ersten Energiesatzes, dass nichts verloren gehe, setzt der zweite sein trotziges »Aber« entgegen, dass nämlich bei jedem Umgang mit Energie, ob Umwandlung oder Anwendung, Transport oder Speicherung, stets ein Teil in Wärme verwandelt werde und dass die Rückverwandlung von Wärme in mechanische Energie (Abschnitt 1.2.6) nie vollständig gelinge. Man kann die beiden Grundsätze auch als den ewigen Kampf der Prinzipien Ordnung und Unordnung deuten. Denn aus der geordneten, gleichförmigen Wanderung der Atome und Moleküle bei der mechanischen und der Elektronen bei der elektromagnetischen Energie wird bei der Umwandlung in Wärme die chaotische Brown'sche Molekularbewegung, die mit steigender Temperatur immer heftiger wird. Ordnung aufrechtzuerhalten, ist in allen Systemen mit Mühen verbunden. Tatsächlich kündigt die Geschichte der Energietechnik über weite Strecken vom Kampf der Ingenieure, sich gegen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu behaupten und das Verhältnis von Ordnung zu Chaos immer weiter zu verbessern. Aus diesem Grund muss man Verständnis dafür haben, wenn Energietechniker sich mit den erneuerbaren Energien manchmal schwer tun. Denn deren niedrige Wirkungsgrade, sowie die vermehrten Transport- und Speichervorgänge, zu

denen ihre zeitliche und räumliche Verteilung zwingt, bedeuten in diesem historischen Kampf einen Rückschritt, auch wenn ihm andere Vorteile gegenüberstehen. Die Bemühungen der Ingenieure um die Verteidigung der Ordnung stoßen wegen der beiden Energiesätze aber prinzipiell an Grenzen: Die ideale Maschine ist unmöglich. Dass Energie in geschlossenen Systemen erhalten bleibt, bedeutet zugleich, dass Energie nicht vermehrbar ist. Bewegung jeder Art ist mit Reibung verbunden, die geordnete Energie in Wärme verwandelt. Deshalb ist ein Perpetuum mobile grundsätzlich nicht realisierbar. Immer wieder versuchen Erfinder, diesen Grundsatz zu überlisten, aber es ist müßig, den manchmal gut versteckten, aber immer vorhandenen Haken an der Sache zu suchen: Ein Perpetuum mobile kann es nicht geben.

### 1.2.6 Thermodynamik

Um von Wärme (Anergie) wieder zu mechanischer Energie (Exergie) zu gelangen, nutzt man die Ausdehnung, die mit der Erwärmung von Gasen verbunden ist. Die Sonne macht uns das vor, wenn sie durch Verdunstung des Oberflächenwassers auf der Erde Wasserdampf erzeugt und erwärmt, der wegen der geringeren Dichte im Verhältnis zur Luft in große Höhen aufsteigt, also potenzielle Energie gewinnt. In geschlossenen Systemen führt diese Ausdehnung der Gase zu einem Druckanstieg.

In der *Dampfmaschine* wird in einem Kessel Wasser erhitzt und auf hohe Temperaturen und auf hohen Druck gebracht. Dieser Dampf wird auf einen Zylinder oder eine Turbine geleitet, wo er einen Kolben oder Turbinenschaufeln in Bewegung setzt und sich dabei entspannt; schließlich wird er in einem Kondensator mit Hilfe von Kühlwasser wieder in flüssiges Wasser zurückverwandelt. Entscheidend für den Effekt des Ganzen, für den Wirkungsgrad, ist dabei die Temperaturdifferenz zwischen den Temperaturen des Dampfes am Eingang der Turbine ( $T_1$ ) und an ihrem Ende ( $T_2$ ). Der Wirkungsgrad ergibt sich, wenn man die Differenz  $T_1 - T_2$  durch  $T_1$  eilt. Allerdings muss man dabei in Kelvin- und nicht in Celsius-Graden rechnen; die Kelvin-Skala beginnt beim absoluten Nullpunkt, der in der Celsius-Skala  $-273^\circ$  entspricht. Da  $T_2$ , also die kalte Seite des thermodynamischen Kreisprozesses, immer weit über diesem Nullpunkt liegt, kann immer nur ein Teil der Wärme in mechanische Energie umgewandelt

werden. Ein Teil der investierten Energie wird also wieder in Anergie verwandelt. Damit sind wir wieder beim zweiten Hauptsatz der Thermodynamik: Bei irreversiblen Energieumwandlungen wird ein Teil der Exergie in Anergie verwandelt.

Da man in einem Kraftwerk natürlich einen möglichst hohen Wirkungsgrad erreichen möchte, um möglichst viel elektrische Energie zu erhalten und möglichst wenig Schadstoffe und  $\text{CO}_2$  zu emittieren, streben die Ingenieure seit Langem nach einer möglichst großen Temperaturdifferenz. Am Ende einer modernen Turbine, dort wo die größten Schaufeln platziert sind, herrschen im besten Fall noch knapp  $30^\circ\text{C}$ , also rund  $300^\circ\text{K}$ . Diese Temperatur kann praktisch nicht weiter abgesenkt werden, denn sie wird durch das als Kühlmedium genutzte Meer- oder Flusswasser bestimmt. Wenn allerdings ein Kühlturm eingesetzt werden muss, um dem Ökosystem des Flusses nicht zu viel Wärme zuzumuten, dann muss man auch ein höheres  $T_2$ , also eine Verminderung des Wirkungsgrades akzeptieren. Die Temperatur am Eingang der Turbine ist durch deren Materialeigenschaften begrenzt. Heute strömt bei modernen Anlagen ca.  $600^\circ\text{C}$ , also  $873^\circ\text{K}$  heißer Dampf mit bis zu 300 bar Überdruck in die Turbine, deren Schaufeln dann rot glühend werden. Um höhere Wirkungsgrade zu erzielen, strebt man noch höhere Eingangstemperaturen an, die eine große Herausforderung für die Materialforschung darstellen. Leider werden die großen Anstrengungen um eine Steigerung der Wirkungsgrade konterkariert durch die erneuerbaren Energien, die durch ihre stark schwankende Verfügbarkeit in Deutschland bereits beim heutigen Stand alle fossil beheizten Kraftwerke zu häufigen Lastwechseln zwingen. Außerhalb des Optimums der Auslegung eines Kraftwerks fällt nämlich der Wirkungsgrad deutlich ab, es erzeugt dann weniger elektrische Energie aus der gleichen Menge Kohle und emittiert deshalb mehr Kohlendioxid pro Kilowattstunde. Bezieht man also die Systemauswirkungen ein, so führt der Einsatz erneuerbarer Energien deshalb nicht, wie meist unterstellt, zu Nullemission bei Schadstoffen und  $\text{CO}_2$ .

Automotoren und Flugtriebwerke sind thermodynamische Maschinen mit einem offenen Kreislauf. Zwar liegt hier die Verbrennungstemperatur im Zylinder sehr hoch, bei  $2500^\circ\text{C}$ , so dass sich bei einer Temperatur von  $80^\circ\text{C}$  am Auspuff ein theoretischer Carnot-Wirkungsgrad von über 80 % ergibt, unter realen Bedingungen errei-

chen Ottomotoren maximal 45 %, Dieselmotoren bis zu 50 %. Flugzeugturbinen haben Wirkungsgrade von 40 %.

### 1.2.7 Aggregatzustände

Bei Umwandlungsprozessen spielen oft auch die Aggregatzustände der Materie eine Rolle, weil die Moleküle in festen Stoffen fester als in flüssigen und in diesen wiederum fester als in gasförmigen gebunden sind. Für das Schmelzen von Wasser von 0 °C muss man pro Gramm 80 Kalorien (cal), für das Verdampfen sogar 539 cal aufwenden. Das bedeutet, dass das Schmelzen von Eis genauso viel Energie erfordert wie Leitungswasser zum Kochen zu bringen, das Verdampfen sogar die sechsfache Energie. Dadurch erklärt sich, warum Eiswürfel in einem Glas nicht sofort schmelzen; die Schmelzwärme entzieht dem Drink viel mehr Energie, als es die Kühlwirkung der Temperaturdifferenz von Eis und Drink vermag. Schnee hält bei kühlen Temperaturen starker Sonneneinstrahlung lange stand, weil er durch die Verdunstung der obersten Schicht sehr effektiv gekühlt wird. Durch das Verdampfen eines Kühlmittels entzieht ein Kälteaggregat dem Inneren des Kühl- oder Gefrierschranks die Wärme und gibt die beim Kondensieren wieder freiwerdende Wärme über Kühlrippen an die Umgebung ab. Bei der *Wärmepumpe* wird dieser Prozess umgekehrt, sie kann deshalb auch kälteren Medien noch Wärme entziehen, die sie auf der »warmen« Seite als Kondensationswärme abgibt. Auf diese Weise kann sie in Bezug auf die Energie, die zur Kompression und zum Transport des Kühlmittels aufgewendet werden muss, unter günstigen Umständen das Fünffache an Wärme abgeben (Abschnitt 4.2.5.1). Den Wechsel von Aggregatzuständen kann man auch zur Speicherung von Energie einsetzen, so eignen sich z. B. spezielle Salze als Tag-Nacht-Speicher für thermische Solarkraftwerke (Abschnitt 4.2.3.3).

### 1.2.8 Wärmeübertragung

Sieht man von dem Trick mit der Wärmepumpe ab, so fließt Wärme immer vom wärmeren zum kälteren Medium. Dafür gibt es drei Mechanismen: die direkte Wärmeleitung durch den Kontakt von Medien unterschiedlicher Temperatur, die Konvektion, bei der ein Transportmedium (z. B. Luft oder Wasser) Wärme aufnimmt und an

anderem Ort an ein kälteres Medium abgibt, und die Wärmestrahlung, die wir schon als Infrarotstrahlung kennen. Wärmestrahlung senden alle Körper aus, auch kalte; was man als Ausstrahlung von Kälte empfindet, ist nur die negative Bilanz der Wärmestrahlung. Unsere Wahrnehmung von Wärme und Kälte ist keineswegs objektiv. Der Mensch verfügt über keinen Temperatursensor. Was er empfindet, ist Zufuhr oder Entzug von Wärme. Bei feuchter Luft, die eine größere Wärmekapazität hat als trockene, ist dieser Austausch intensiver, deshalb schwitzen und frieren wir in feuchtem Klima schon bei Temperaturen, die wir in trockenem Klima noch als angenehm empfinden. Als Warmblüter muss der Mensch seine Körpertemperatur innerhalb einer verhältnismäßig engen Spanne konstant halten. Kühlen kann er sich durch die Verdunstungswärme des Schweißes, erwärmen durch die Arbeit seiner Muskeln, die im Ruhezustand durch die Aktivität des Herzens, der Lunge und der anderen Organe rund 50 W beträgt, dauerhaft auf 80 W und kurzzeitig auf ein Mehrfaches dieses Wertes steigen kann, oder auch durch die Umgebungswärme in Natur oder Wohnräumen. Dabei spielt die Strahlungswärme für unser Wohlbefinden eine besondere Rolle. Man kann sich auch in Räumen mit 15 °C wohl fühlen, wenn durch stärkere Wärmestrahlung eine höhere Temperatur simuliert wird. Wärme ist für unser Wohlbefinden sehr wichtig. Zurzeit wenden wir in den Haushalten in Deutschland, bedingt durch unsere klimatischen Bedingungen, den weitaus größten Teil der verfügbaren Energie für die Raumheizung auf. In Zukunft kann man die hier beschriebenen Besonderheiten unseres Wärmehaushalts und unseres Wärmeempfindens für effektivere Heizsysteme nutzen (Abschnitt 5.4.2).

### 1.3 Der Energiesektor und seine Besonderheiten

In vierzig Jahren fängt das Leben neu an.

*(Leicht verfremdeter Titel eines Liedes von Udo Jürgens)*

Schon der Blick auf die Geschichte der Energieversorgung hat deutlich gemacht, dass mit dem zunehmenden Einsatz von Energie verschiedene Konsequenzen für unser Leben verbunden sind. Sie sollen in den Kapiteln zu den einzelnen Energieträgern detailliert behandelt werden. Aber es gibt Gemeinsamkeiten bei allen Energieträgern:

### 1.3.1 Energieeinsatz führt zu Abhängigkeiten

Wir gewöhnen uns rasch an jede neue Form der Energiedienstleistung, wie Licht, Wärme oder auch neue Kommunikationsformen, und können schon bald nicht mehr darauf verzichten. So ist der Gewinn an Mobilität durch den öffentlichen und individuellen Verkehr längst Voraussetzung für unsere immer ausdifferenziertere Arbeitswelt geworden, in der viele Menschen täglich oder als Wochenendpendler weite Wege zur Arbeit zurücklegen müssen. Wenn durch Steigerung der Benzin- und Dieselpreise diese Balance gestört wird und der Gewinn durch die höherwertige aber entferntere Arbeitsstelle schwindet, dann zeigt sich, wie abhängig wir inzwischen von einer Versorgung mit Treibstoffen zu wirtschaftlichen Bedingungen geworden sind.

Noch ausgeprägter ist die Abhängigkeit bei den leitungsgebundenen Energien Gas, Fernwärme und Strom, bei denen der Verbraucher, anders als früher bei Holz und Kohle, nicht mehr über eigene Vorräte verfügt. Wie groß diese Abhängigkeit beim Strom geworden ist, zeigt Exkurs 1 »Was bei einem Blackout passiert«. Aber auch bei Gas und Fernwärme sind wir auf die jederzeitige Verfügbarkeit angewiesen, eine dezentrale Speicherung ist nicht möglich. Bei Treibstoffen ist die private Lagerung einfacher, hier reicht die Speicherkapazität im Auto für bis zu 1000 km und bei der häuslichen Ölheizung für mehrere Monate.

Die Versorgungssicherheit ist eine wichtige Aufgabe der Energieversorgungsunternehmen und des Staates, vor allem da Deutschland einen großen Teil der Energie einführen muss, rund 97 % des Rohöls bzw. von Raffinerieprodukten, 75 % des Erdgases, künftig auch Strom in wachsendem Umfang. Bei Öl und Gas ist die Situation durch die Abhängigkeit von großen, nicht immer politisch stabilen Regionen geprägt. Beim Gas dominiert Russland als nicht ganz berechenbarer Versorger, während unser Öl 2012 aus insgesamt 33 *Lieferländern* kam (Abschnitt 3.2.3), am meisten wiederum aus der Russischen Föderation, gefolgt von Großbritannien und Norwegen, nur 23 % wurden aus *OPEC*-Mitgliedsländern importiert. 1973 und 1979 hatten die in der *OPEC* zusammengeschlossenen ölexportierenden Staaten durch bewusste Verknappung des Angebots ihre Macht demonstriert und zwei Energiekrisen mit erheblichen nachteiligen Folgen für die Weltwirtschaft ausgelöst. Als Reaktion darauf haben die westlichen Staa-

ten die *Internationale Energie-Agentur* (Abschnitt 2.1) gegründet und in deren Rahmen ein System der Bevorratung von Öl und Gas aufgebaut. Heute verfügt Deutschland über private und staatliche Vorräte für 90 Tage beim Öl und 60 Tage beim Erdgas. Dieses System macht uns weniger krisenanfällig und gibt uns genügend Zeit, beim Ausfall einzelner Lieferanten zu anderen zu wechseln.

Bei der elektrischen Energie ist eine Vorratshaltung in nennenswertem Umfang nicht möglich. Strom muss in derselben Sekunde erzeugt werden, in der der Bedarf entsteht, und er muss in engen Grenzen die Frequenz von 50 Hz einhalten. Innerhalb des in Europa bestehenden Verbundnetzes ist Strom ein europäisches Wirtschaftsgut. Ob wir Strom importieren oder ausführen, entscheidet sich an der Leipziger Strombörse ausschließlich nach den Preisen. Daraus ergibt sich ein lebhafter, aber mengenmäßig begrenzter Austausch (Abb. 6.12). Deutschland war seit Einführung der Börse Nettoexporteur und blieb dies im ersten Jahr nach der Energiewende auch noch, allerdings ist die finanzielle Stromhandelsbilanz negativ geworden, weil wir teure Spitzenlast nun nicht mehr aus-, sondern einführen. Für die Zukunft muss mit weiter steigenden Stromimporten gerechnet werden (Abschnitt 6.3.1) Der europäische Stromhandel hat wirtschaftliche Vorteile, ist aber nicht völlig krisensicher, weil es in einzelnen Ländern z. B. aus klimatischen Gründen Verknappungen geben kann, so dass bestimmte Angebote zeitweilig nicht zur Verfügung stehen können. Wir brauchen also eine ausreichende Reservekapazität. Sehr problematisch wäre es aber, wenn wir uns systematisch von großen Stromlieferungen aus Ländern außerhalb der EU abhängig machten (Abschnitt 4.2.3.3). So attraktiv der Gedanke ist, Sonnenenergie höchster Intensität in der nordafrikanischen Wüste zu »ernten«, wo wenige Prozent der Fläche der Sahara für die Stromversorgung der ganzen Welt ausreichen würden, so risikoreich wäre eine größere Abhängigkeit aus einer instabilen Region über lange, verletzbare Versorgungswege.

### 1.3.2 Kein Segen ohne Fluch

Der Energieeinsatz hat uns von schwerer körperlicher Arbeit befreit, ein effektives Wirtschaften mit hohem Lebensstandard ermöglicht und uns mobil gemacht. Doch sind diese Vorteile immer, wenn auch nicht im gleichen Maße, mit Nachteilen und Risiken verbunden.

Auch wenn wir den absichtlich zerstörerischen Einsatz von Energie durch Waffen außer Acht lassen, so geht grundsätzlich von gespeicherter Energie immer ein Risiko aus, sei es die potenzielle Energie eines Staudammes, der brechen und gewaltige Wassermassen ins Tal entlassen kann, sei es die Explosionsgefahr von chemischen Energieträgern. Auch bei der Gewinnung der Energiequellen lauern Gefahren, vor allem im Kohlebergbau oder bei der Öl- und Gasgewinnung. Die Energieumwandlung war, vor allem bei der Kohle, stets von erheblichen Umweltproblemen begleitet, die man erst nach und nach in den Griff bekommen hat. Heute sind alle Kraftwerke umweltverträglich, aber aus fossilen Energiequellen entsteht in ihnen unvermeidbar das klimaschädliche Verbrennungsprodukt CO<sub>2</sub> (Kapitel 2), das heute die größte Sorge der Energiepolitik bildet. Die Kernkraft hat im Normalbetrieb, mit Ausnahme des Uranabbaus, keine nennenswerten Umweltauswirkungen, birgt aber große Gefahren durch das radioaktive Inventar der Reaktoren und der Abfälle. Die erneuerbaren Energien sind prinzipiell umweltverträglich, können bei massivem Auftreten aber auch Landschaften und Städte beeinträchtigen und Schäden an Ökosystemen verursachen.

Neben der Versorgungssicherheit und der Wirtschaftlichkeit ist die Umweltverträglichkeit und Sicherheit der einzelnen Energiequellen für ihre heutige und künftige Rolle maßgeblich. Jede zukunftsfähige Energiepolitik muss sich diesen drei Zielen gleichrangig verpflichtet fühlen. Sie haben große Bedeutung für die Zukunftschancen der einzelnen Energietechnologien und werden deshalb in den Kapiteln 3 und 4 eingehender behandelt. Dem besonderen Problem des Klimaschutzes ist Kapitel 2 gewidmet.

### 1.3.3 Energie als Wirtschaftsfaktor

»Die Sonne schickt keine Rechnung« lautet ein Slogan der Solar-Lobby. Das tun aber Kohle, Öl, Gas und Uran, wenn man sie der Erde abringt, auch nicht. Um die Energien freizusetzen ist jedoch meist, und zunehmend, ein hoher Aufwand erforderlich, den die dabei tätigen Unternehmen nicht selbstlos erbringen: Mit Energie kann sehr viel Geld verdient werden. Dabei sorgt die internationale Konkurrenz dafür, dass wir immer die am leichtesten zu gewinnenden Ressourcen dieser Erde zuerst verbrauchen; niemand kommt auf den Gedanken, einen Teil davon für kommende Generationen zu schonen. Schon



jetzt ist ein großer Teil der Ressourcen verbraucht: In Deutschland ist die abbauwürdige Steinkohle längst erschöpft und weltweit gehen die leicht sprudelnden Öl- und Gasquellen ihrem Ende entgegen. Zur Gewinnung von Öl und Gas müssen immer aufwändigere, und wie sich gezeigt hat, auch immer risikoreichere Technologien eingesetzt werden. Bei den seit einigen Jahren wieder hohen Öl- und Gaspreisen lohnen sich diese Verfahren; die abbaubaren Vorräte haben sich dadurch wieder erheblich vergrößert. Erst recht lohnen sich die noch leicht erschließbaren Ressourcen, wie z. B. in Saudi-Arabien, wo einem Ölpreis von zurzeit 80–100 \$ pro Barrel Produktionskosten von ca. 5 \$ pro Barrel gegenüberstehen.

Innerhalb der Europäischen Gemeinschaft ist Energie ein frei handelbares Gut. Im Jahr 2000 wurde auch der Strommarkt liberalisiert. Die zusammengewachsenen Stromnetze der Mitgliedsländer erlauben einen angemessenen Austausch. Waren früher Versorgungsunternehmen für eine bestimmte Region zuständig, so kann nun der Kunde wählen, bei wem er seinen Strom kauft, denn Verteilung und Erzeugung sind nicht mehr in einer Hand. Aus den großen Unternehmen der Stromwirtschaft sind dadurch aber gewinnorientierte Kapitalgesellschaften geworden, die ihr Geld international dort investieren, wo es die größte Rendite verspricht. In deutlichem Kontrast dazu verteidigen die europäischen Mitgliedsländer die Energiepolitik noch immer als nationale Domäne.

Die offenbar maßgebliche Überzeugung im europäischen Binnenmarkt, dass der Wettbewerb alles am besten regelt, greift nicht für die Verteilnetze, denn davon gibt es naturgemäß nur eines. Deshalb gibt es hier auch wieder eine staatliche Kontrolle der Gebühren, die der Netzbetreiber erheben darf; in Deutschland regelt das die *Bundesnetzagentur*. In diesem System ist der dringend erforderliche Ausbau des Netzes (Abschnitt 5.1.4) bisher nur unzureichend vorangekommen, wozu lokale Widerstände und lange Planungs- und Genehmigungsverfahren beigetragen haben.

Auch bei den Preisen, die der Verbraucher für bestimmte Energieträger bezahlen muss, unterscheidet sich die Energiewelt vom Rest der Wirtschaft. Denn die Energiepreise haben mit den Kosten besonders wenig zu tun. Die Staaten greifen kräftig in das Preisgefüge ein, und zwar in beide Richtungen; sie besteuern die einen und subventionieren die anderen Energieträger, mit dem Ergebnis, dass der Verbraucher kein Gefühl für den echten ökonomischen Wert der

Energie entwickeln kann. So besteht in Deutschland die Rechnung an der Tankstelle zu 60% aus Steuern, nämlich aus der *Mineralölsteuer* und der danach, also auch auf die Mineralölsteuer, erhobenen Mehrwertsteuer. Zu dem deutschen Strompreis von zurzeit etwa 28 ct tragen die Erzeugung im Kraftwerk und die Verteilung über das Netz nur rund zur Hälfte bei. Fast genauso hoch sind die staatlichen Abgaben: Konzessionsabgaben an Gemeinden, weiter die 1998 eingeführte Ökosteuern, ein zusätzliches Netzentgelt und seit 2000 die Umlage nach dem Gesetz zur Förderung der erneuerbaren Energien (*EEG*) (Abschnitt 5.1.3). Die Förderung der deutschen Steinkohle, die etwa das Dreifache des Preises für Importkohle kostet, wurde bis jetzt mit hohen Subventionen aufrechterhalten. Auch andere Mitgliedsländer der IEA subventionieren die Förderung von heimischen fossilen Energien, um die Importabhängigkeit zu vermindern; die IEA schätzt das Volumen dieser Subventionen in der westlichen Welt auf 45–75 Mrd. \$ pro Jahr [6, S. 511]. Mit 300–400 Mrd. \$ pro Jahr sind die Subventionen jedoch noch wesentlich größer, mit denen die ölexportierenden Staaten, allen voran Iran und Saudi-Arabien, ihre Bevölkerung an den Importerlösen teilhaben lassen oder die Armut bekämpfen [6, S. 512–522]. Auch wenn beide Ziele, die Senkung der Importabhängigkeit bei den IEA-Staaten und die Weitergabe von Gewinnen an die Armen durch die ölexportierenden Staaten nachvollziehbar sind, so haben sie doch beide zur Konsequenz, den Beitrag der fossilen Energien zur Bedarfsdeckung zu stabilisieren. Sie konterkarieren damit die Bemühungen um den Klimaschutz (Abschnitt 2.3).

#### 1.3.4 Zeitkonstante: 40 Jahre

Den rasanten Fortschritt, der unsere Handys und Computer in wenigen Jahren veralten lässt, kennt die Energietechnik nicht. Hier muss man in der Größenordnung eines halben Menschenlebens denken lernen. 40 Jahre ist die normale Lebensdauer eines Kraftwerks oder anderer Einrichtungen der Energieinfrastruktur. Auch passive Systeme der Energieeinsparung, wie Isolationen oder Fenster, sollten spätestens nach etwa 40 Jahren erneuert werden. Deshalb müssen Weichenstellungen und Investitionen im Energiesektor besonders verantwortungsbewusst und besonnen entschieden werden – ein krasser Gegensatz zu den oft hektischen Reaktionen vieler Politiker. Ein Beispiel für diesen Gegensatz: In den achtziger Jahren des vori-

gen Jahrhunderts wurde unter dem Eindruck des scheinbar dramatischen *Waldsterbens* eine rasche Entschwefelung und Entstickung der Abgase der bestehenden Kohlekraftwerke durchgesetzt. Etwa 2 Mrd. € wurden in die bestehenden Kraftwerke investiert, die daraufhin natürlich weit länger als vorher geplant in Betrieb blieben, um diese Investitionen amortisieren zu können. Nachhaltiger wäre es gewesen, sich mehr Zeit zu lassen und die bestehenden Kohlekraftwerke nach und nach durch neue zu ersetzen; dann hätte man die Rückhaltmaßnahmen von vorneherein, also viel effizienter, einplanen und zudem noch einen viel höheren Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung erreichen können. Aber das war angesichts der Hysterie um das Waldsterben nicht vermittelbar. Später stellte sich dann heraus, dass der Begriff »Waldsterben« übertrieben war und die Ursachen für die beobachteten Schäden viel komplexer waren: Neben dem »sauren Regen«, den die Emissionen aus den Kohlekraftwerken verursachten, spielten auch Ozon und Schwermetalle, vor allem das Fehlen des durch frühere Umweltschutzmaßnahmen eliminierten basischen Staubes, aber auch Mängel der Forstwirtschaft (Monokulturen) eine Rolle.

40 Jahre ist aber auch die Größenordnung, in der sich Energiepolitik wandelt. Das erste Energieprogramm der Bundesregierung wurde in der Energiekrise 1973 formuliert, es liegt nun 40 Jahre zurück. Seine Weichenstellungen, vor allem zum Ausbau der Kernenergie, sind politisch erst durch Energiekonzept und Energiewende der Jahre 2010/11 endgültig aufgehoben und durch neue Perspektiven für 2050 ersetzt wurden, also für die nächsten 40 Jahre. Vor 40 Jahren waren alle Parteien des deutschen Bundestages noch Anhänger der Kernkraft, erst 2011 herrschte wieder Einigkeit, jetzt gegen die Kernenergie und für die erneuerbaren Energien. Wie wird das Bild um 2050, in weiteren 40 Jahren, aussehen?

Die Zeitspanne von 40 Jahren wird uns in diesem Buch in unterschiedlichen Bereichen immer wieder begegnen.

---

### **Exkurs 1 Was bei einem längeren Blackout geschieht**

Wie sehr Energie, vor allem elektrische Energie, heute zur unverzichtbaren Lebensgrundlage des modernen Menschen geworden ist, kann man sich bewusst machen, wenn man untersucht, was bei einem

überregionalen Zusammenbruch der Stromversorgung über mehrere Tage geschieht. Eine Studie [10] mit vielen Beteiligten unter Federführung des Büros für Technikfolgenabschätzung des deutschen Bundestages, das vom *KIT* betrieben wird, kam zu folgenden Ergebnissen:

1. Information und Kommunikation brechen fast vollständig zusammen. Als Erstes fällt das Festnetztelefon aus und mit ihm auch die meisten Internet- und Mailanschlüsse. Mobiltelefone können einige Tage durchhalten, das nutzt aber nichts, weil die Basisstationen nach kurzer Zeit ausfallen. Fernseher funktionieren nicht mehr, allein über batteriebetriebene Radios oder durch Notausgaben von Zeitungen kann man noch Informationen erhalten.
2. Der gesamte Schienenverkehr bricht sofort zusammen. Zahlreiche Reisende müssen aus U-Bahnen, aus Tunneln, von Brücken oder aus auf freier Strecke liegenden gebliebenen Zügen geborgen werden. In den Städten fällt die Verkehrsregelung aus, die Straßen werden verstopft durch Unfallfahrzeuge, danach zunehmend durch Autos mit leeren Tanks. Auf den Autobahnen merkt man zunächst nichts vom Blackout bis mehr und mehr Fahrzeuge aus Spritmangel liegen bleiben, denn die Tankstellen funktionieren nur noch eingeschränkt. Flughäfen können noch für einige Tage einen begrenzten Start- und Landebetrieb aufrechterhalten, aber der Zu- und Abgang der Passagiere wird immer schwieriger.
3. Förderung, Aufbereitung und Verteilung von Wasser sind nach kurzer Zeit stark eingeschränkt, und das Verteilsystem funktioniert nur noch bei natürlichem oder künstlichem Gefälle. Es steht kein Wasser mehr für Trinken, Kochen und Hygiene zur Verfügung. Die Toiletten verstopfen, und die Gefahr der Ausbreitung von Krankheiten nimmt zu. Gleichzeitig wächst das Risiko von Bränden, weil z. B. in Industrieanlagen die Kühlung ausfällt oder in den Haushalten versucht wird, ohne Strom zu kochen. Andererseits ist aber auch die Brandbekämpfung stark beeinträchtigt.
4. Die komplexe Versorgungskette mit Lebensmitteln von der Rohstoffproduktion bis zu den Fertigerzeugnissen wird unterbrochen. Die bedarfsgerechte Versorgung der Bevölkerung wird zum Problem, von dessen erfolgreicher Bewältigung nicht nur das Überleben zahlreicher Menschen, sondern auch die Aufrechterhaltung der öffentlichen Ordnung abhängt. Dramatisch wirkt sich der Blackout in der Massentierhaltung aus: Schweine und Geflügel überleben oft schon die ersten Stunden nicht.

5. Das dezentral und hoch arbeitsteilig organisierte Gesundheitswesen kann den Folgen eines Stromausfalls nur kurz widerstehen. Krankenhäuser können nur noch einen eingeschränkten Betrieb unterhalten, Dialysezentren, Alten- und Pflegeheime müssen geräumt werden. Arztpraxen und Apotheken müssen schließen. Arzneimittel werden rasch knapp. Dramatisch werden Engpässe bei Insulin, Blutprodukten und Dialyseflüssigkeiten. Rettungsdienste können nur noch begrenzt für Transport und Evakuierungseinsätze eingesetzt werden, weil sie durch vielseitige Anfragen überfordert und selbst von Treibstoffmangel und Ausfall der Kommunikation betroffen sind.
6. Bankfilialen bleiben für Kunden geschlossen, weil nur noch der banken- und börseninterne Datenaustausch aufrechterhalten werden kann; auch Geldautomaten funktionieren nicht mehr, so dass die Bevölkerung bald keine Bezahlungsmöglichkeiten mehr hat.

Alles zusammen führt zu Unsicherheit in der Bevölkerung, die verschiedene Auswirkungen haben kann, vermehrte Bereitschaft zur gegenseitigen Hilfe ebenso wie Plünderungen und andere Ausschreitungen.

Wegen der hohen Stromintensität der deutschen Wirtschaft verursacht jede ausgefallene kWh Kosten von 8–16 €. Bei einem deutschlandweiten Stromausfall im Winter entsteht damit in einer Stunde ein wirtschaftlicher Schaden von 0,6–1,3 Mrd. €, pro Tag also ein Verlust von 20–30 Mrd. €.

---

